



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

VÝROBA POUZDRA PRUŽINY OBJEMOVÝM TVÁŘENÍM

PRODUCTION OF SPRING BUCH BY COLD FORMING

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. LUKÁŠ KOSEK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Ing. MILAN FOREJT, CSc.

BRNO 2013

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2012/2013

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Lukáš Kosek

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie (2303T002)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Výroba pouzdra pružiny objemovým tvářením

v anglickém jazyce:

Production of spring buch by cold forming

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Návrh technologie velkosériové výroby pouzdra pro vedení pružiny z konstrukční oceli 11320-5R objemovým tvářením za studena s důrazem na operace protlačování a přechování.

Cíle diplomové práce:

Zásady pro vypracování:

1. Vypracovat literární studii se zaměřením na objemové (kombinované)tvářením za studena
2. Zhodnotit současný stav výroby součásti obdobného tvaru
3. Navrhnout vlastní technologii výroby se zaměřením na varianty a jejich hodnocení
4. Vypracovat výkresovou dokumentaci postupového nástroje
5. Zpracovat technické a ekonomické hodnocení
6. Formulovat závěry a doporučení

Seznam odborné literatury:

1. LANGE, Kurt, et al. Handbook of metal forming. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.
2. ELFMARK, Jiří, et al. Tváření kovů. Ing. Pavel Vávra. 1. vyd. Praha : SNTL, 1992. 524 s. Technický průvodce; sv. 62. ISBN 80-03-00651-1.
3. MIELNIK, Edward M. Metalworking science and Engineering. Michael B. Bever. 1st edition. New York : McGraw-Hill, Inc., 1991. 976 s. ISBN 0-07-041904-3.
4. FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. Teorie obrábění, tváření a nástroje. Milan Forejt; Design obálky: Ildikó Putzová. 1. vyd. Brno : Akademické nakladatelství CERM, 2006. 226 s. ISBN 80-214-2374-9.

Vedoucí diplomové práce: prof. Ing. Milan Forejt, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2012/2013.

V Brně, dne 25.10.2012

L.S.

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

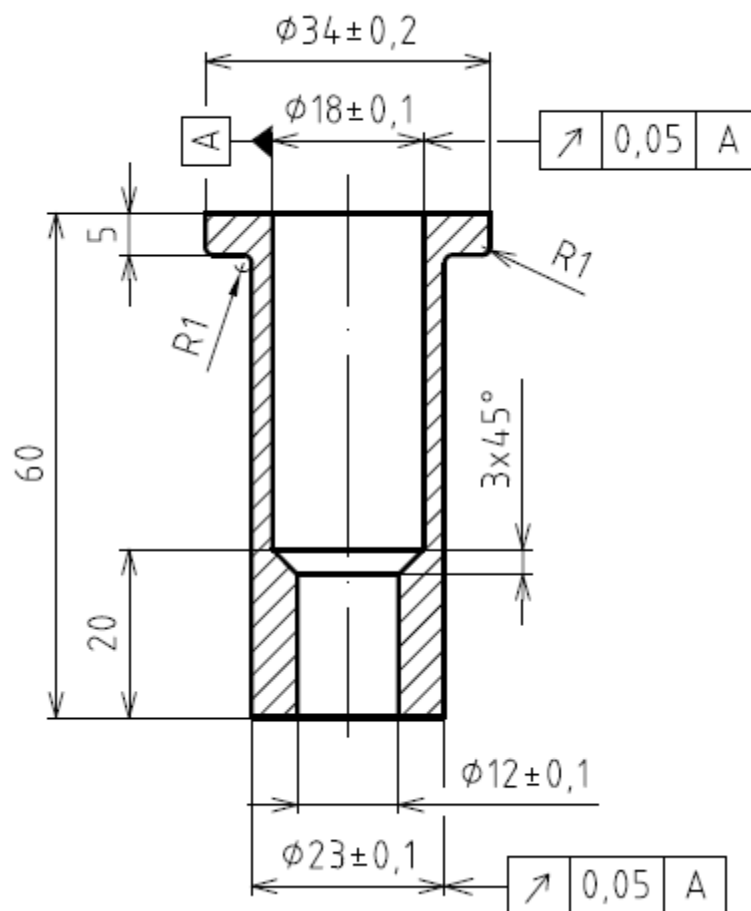
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

ZADANÁ SOUČÁST

Výrobní série: 250 000 ks/rok

Výchozí materiál: ocel 11 320-5R

M 1:1



ABSTRAKT:

KOSEK Lukáš: Výroba pouzdra pružiny objemovým tvářením

Diplomová práce předkládá návrh technologie výroby pouzdra pro vedení pružiny z konstrukční oceli 11 320-5R objemovým tvářením za studena. Na základě literární studie zaměřené na objemové tvářením za studena a následných výpočtů byl navržen postup výroby součásti v pěti tvářecích operacích. Pro navrženou technologii byl zvolen postupový tvářecí automat HATEBUR AKP 5-5. Polotovarem byl zvolen špalík o průměru 26 mm a délce 29 mm. V ekonomickém hodnocení je pro roční dávku 250 000 ks stanovena cena jedné součásti 16 Kč.

Klíčová slova: zpětné protlačování, dopředné protlačování, ocel 11 320-5R, tvářecí automat

ABSTRACT:

KOSEK Lukáš: Production of spring bush by cold forming

The master's thesis presents a concept for spring bush manufacturing made of 11 320-5R steel by cold forming. Five steps process of manufacturing is based on the literary studies and technical calculations. The multistage cold forming machine HATEBUR AKP 5-5 was chosen for selected option of forming technology. As raw material was used cylinder shape with diameter of 26 mm and length of 29 mm. The economic results fix the price of one component of 16 CZK for annual dose 250 000 pieces.

Keywords: backward extrusion, forward extrusion, 11 320-5R steel, cold-forming machine

Bibliografická citace:

KOSEK, L. *Výroba pouzdra pružiny objemovým tvářením*. Brno, 2013. 62 s., 5 výkresů, 3 přílohy, CD. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí prof. Ing. Milan Forejt, CSc..

Prohlášení:

Tímto prohlašuji, že předkládanou diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího diplomové práce.

V Brně dne 22.5.2013

.....

Podpis

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval prof. Ing. Milanu Forejtovi, CSc. za jeho náměty, cenné rady a vedení mé diplomové práce.

OBSAH

Zadání	
Abstrakt	
Bibliografická citace	
Čestné prohlášení	
Poděkování	
Obsah	
1. ÚVOD.....	13
2. TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA	14
2.1. Metody objemového tváření za studena.....	14
2.1.1. Dopředné protlačování	14
2.1.2. Zpětné protlačování	14
2.1.3. Sdružené protlačování	15
2.1.4. Pěchování.....	15
2.2. Nástroje pro objemové tváření za studena	16
2.2.1. Charakteristiky nástrojů pro dopředné protlačování	16
2.2.2. Charakteristiky nástrojů pro zpětné protlačování	18
2.2.3. Nástroje pro pěchování	20
2.3. Požadavky na nástroje pro objemové tváření za studena	21
2.4. Požadavky na materiály vhodné k objemovému tváření.....	22
2.4.1. Vlastnosti ocelí pro objemové tváření	22
2.4.2. Příprava materiálu pro protlačování	24
2.5. Technologičnost výroby objemovým tvářením.....	25
2.6. Stroje pro objemové tváření	27
3. POSOUZENÍ SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÍ.....	28
3.1. Materiál pro výrobu součásti.....	28
3.2. Možnosti výroby	29
4. NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY SOUČÁSTI	30
4.2. Technologické varianty výroby	31
4.3. Návrh rozměrů ve všech operacích	37
4.4. Výpočet tvářecích sil a prací	39
4.5. Výpočet radiálního tlaku ve 3.operaci.....	47
4.6. Návrh sestavy nástroje	48
5. TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ	53
6. ZÁVĚRY	57
Seznam použitých zdrojů	
Seznam použitých symbolů a zkratk	
Seznam příloh	

1. ÚVOD

Historie technologie objemového tváření je známá již od počátku třicátých let dvacátého století, kdy nastal velký rozvoj leteckého a automobilového průmyslu. Do konce druhé světové války byl položen základ technologie protlačování ocelových materiálů, který sloužil převážně pro vojenské účely při výrobě ocelových nábojů. S průběhem dalších dekád a stále vyššími požadavky v oblasti automobilového průmyslu rostl vývoj i v oblasti objemového tváření díky rozvoji výpočetní techniky, matematického modelování a simulacím ve tvářecích procesech, které dostalo výrobu strojních součástí na špičkovou úroveň.

Technologie objemového tváření za studena patří mezi základní a vysoce produktivní technologické operace, které lze využít ve výrobě převážně rotačních a symetrických strojních součástí jako jsou například šrouby, matice, čepy, pouzdra, podložky a další, z polotovarů používaných ve velkosériové výrobě. Materiál je tvářen tlakovou silou v průtlačnici za použití průtlačníku při změně rozměru průřezu. Aby se snížilo namáhání průtlačnice, je opatřena objímkou. Efektivita výroby je v tomto ohledu dána správnou funkcí a životností tvářecích nástrojů. Toto se dá podstatně ovlivnit jejich konstrukcí, kterou ovlivňuje mnoho činitelů jako např. geometrie nástroje, mechanické vlastnosti a tepelné zpracování materiálu nástroje. Proces tváření lze pomocí experimentálních metod popsat za pomoci reálných dynamických podmínek. Díky tomu je možné stanovit optimální parametry nástrojů, strojů a lze vhodně zvoleným postupem a procesními podmínkami výroby nahradit technologii obrábění u velké části symetrických výrobků a výrazně tak zkrátit výrobní čas.



Obr.1.1: Příklady součástí vyrobených objemovým tvářením za studena [7]

2. TECHNOLOGIE OBJEMOVÉHO TVÁŘENÍ ZA STUDENA [1], [2], [3], [9]

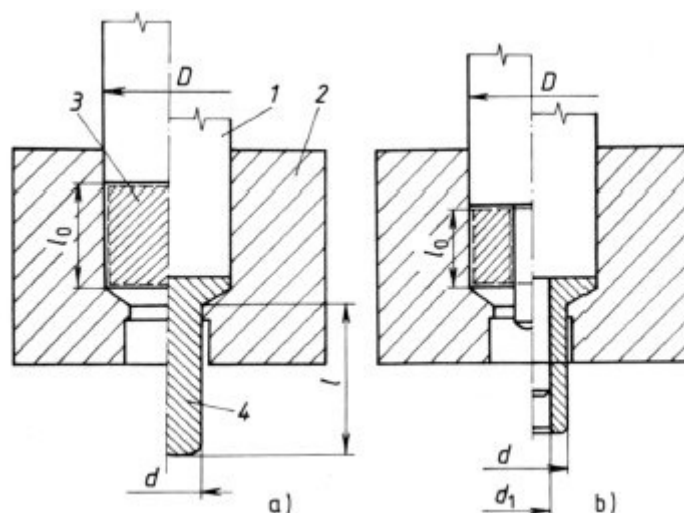
Základem objemového tváření za studena je změna tvaru a tloušťky polotovaru. V porovnání s jinými metodami tváření probíhá pod rekrytalizační teplotou a za působení prostorové napjatosti, která vytváří podmínky pro velké trvalé deformace bez porušení soudržnosti materiálu. Dochází tak k zlepšení mechanických vlastností v důsledku zpevnění, dále je dosažena vyšší mez kluzu a vyšší pevnost součástí. Mezi výhody této metody patří minimální odpad výchozího materiálu, vysoká výrobnost, vysoká kvalita hotových výrobků z důvodu pevnosti neporušených vláken, nízká spotřeba energie a nízké výrobní náklady.

Podle způsobu směru a způsobu tečení materiálu v protlačovaném nástroji rozeznáváme tyto způsoby protlačování: dopředné, zpětné, stranové, hydrostatické, sdružené, kombinované.

2.1. Metody objemového tváření za studena [1], [3], [5]

2.1.1. Dopředné protlačování

Při dopředném protlačování se materiál pohybuje ve směru pohybu průtlačníku a vytéká z otvoru na výstupu z průtlačnice. Výchozím polotovarem může být špalík, kalíšek nebo prstenec. Nejdůležitější geometrickou částí průtlačnice je redukční část, jejíž tvar má vliv na tok materiálu a významně ovlivňuje velikost a průběh protlačovací síly. Při výrobě se velmi často dopředné protlačování sdružuje s pěchováním nebo zpětným protlačováním, aby se zredukoval počet tvářecích operací.



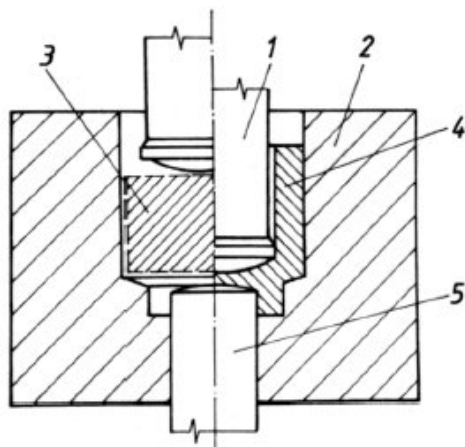
Obr.2.1: a) schéma protlačování plného tělesa, b) schéma protlačování dutého tělesa [5]
1-průtlačník, 2-průtlačnice, 3-polotovarov, 4-průtlaček

2.1.2. Zpětné protlačování

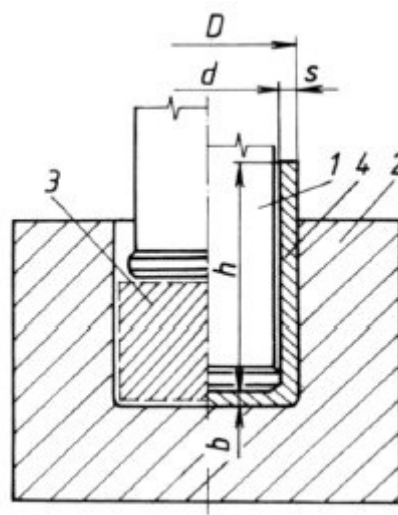
Při zpětném protlačování teče materiál proti směru pohybu průtlačníku. Během procesu se nejprve zaplňuje mezera mezi stěnou průtlačnice a polotovarem, dále dojde ke zpevnění materiálu v oblasti pod průtlačníkem, kdy se vytvoří tzv. ohnisko deformace. Poté je materiál pod průtlačníkem v plastickém stavu. Kov v průběhu protlačování vytéká prstencem mezi průtlačníkem a průtlačnicí a dále se nepřetváří, ale pouze vysouvá. Polotovarem je špalík,

kruhového nebo jiného rozměru. Tvar protlačku je většinou kalíšek, který se může dále tvářet, obrábět nebo je finálním výrobkem.

Během protlačování nejsou směry hlavních souřadnicových os stejné se směry hlavních deformací a proces přetvoření je tak nerovnoměrný. Tuto nehomogenní plastickou deformaci lze řešit celou řadou postupů, mezi které patří například metoda řešení dle Siebela, Sachse, Thomsona, Dippera a dalších.



Obr.2.2: schéma sdruženého protlačování [5]
1-průtláčník, 2-průtláčnice, 3-polotovar,
4-průtláček, 5-trn



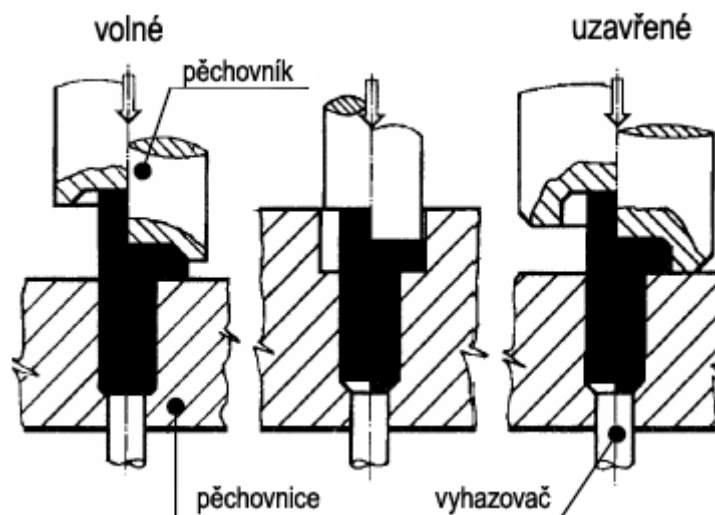
Obr.2.3: schéma zpětného protlačování [5]
1-průtláčník, 2-průtláčnice, 3-polotovar,
4-průtláček

2.1.3. Sdružené (obousměrné) protlačování

Sdružené protlačování je kombinací dopředného a zpětného protlačování, kdy materiál teče oběma směry současně. Musí zde platit podmínka, že stupeň deformace v dolní části průtláčku na dně průtláčnice musí být menší, než v horní části, kterou tváří průtláčník, jinak materiál do tvarovaného dna nezateče. Výchozím polotovarem může být rondel, špalík nebo prstenec.

2.1.4. Pěchování

Pěchování je základní tvářecí operace, při které dochází za působení síly ke zmenšování výšky na úkor zvětšování příčného průřezu polotovaru. V důsledku tření je v celém objemu součásti nerovnoměrná deformace a vzniká tak soudečkovitý tvar. Funkční plochy pěchovacích nástrojů se leští, polotovar se před pěchováním maže, aby nedošlo ke vzniku trhlin v části největšího průměru polotovaru. Pěchování se využívá buď jako samostatná operace při výrobě hlav šroubů, nýtů, matic apod. anebo jako pomocná operace při kalibraci průměru a zarovnání nerovných čel špalíků dělených stříháním, které se následně protlačují. Dále je možnost využití pěchování v kombinaci s protlačováním a jako součást při víceoperačních postupech výroby.



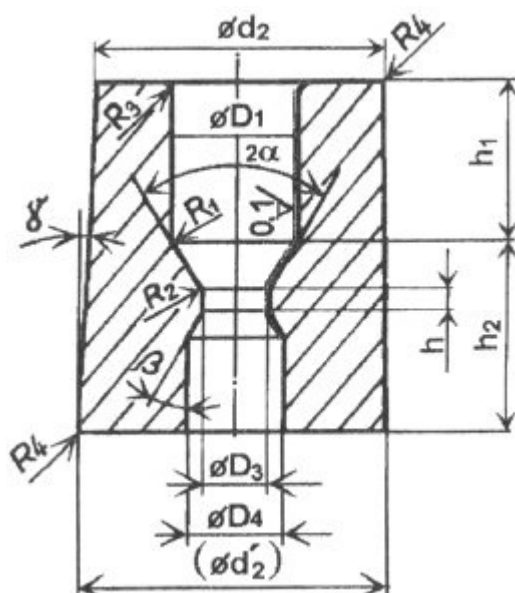
Obr.2.4: schéma volného a uzavřeného pěchování [3]

2.2. Nástroje pro objemové tváření za studena [3], [4]

2.2.1. Charakteristiky nástrojů pro dopředné protlačování [3], [4]

Průtlačnice pro dopředné protlačování

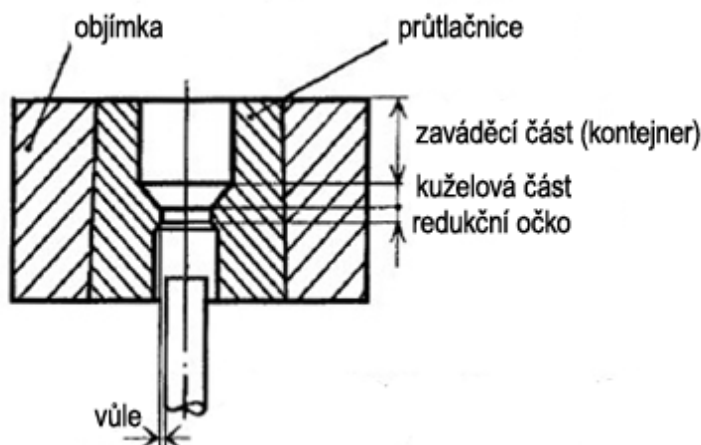
Nejdůležitější částí průtlačnice je redukční část - očko, jejíž tvar má vliv na tok materiálu a významně ovlivňuje velikost deformačního odporu. Nejpoužívanějším tvarem oka průtlačnice je redukční kužel, který je z výrobního hlediska nejlépe vyrobitelný. Dutina průměru ϕD_1 přechází do pracovního průměru ϕD_3 kuželovou plochou s vrcholovým úhlem 2α . Redukčního úhlu se využívá v rozsahu od 30° do 90° . Výšku redukčního oka h volíme v závislosti na teplotě tváření. Průtlačnice je odlehčena na průměr ϕD_4 , kde je přechod proveden pozvolným způsobem, aby se výsledný protlaček při vysouvání nepoškodil. Na obr 2.5 je zobrazen příklad tvaru průtlačnice s doporučenými rozměry v tabulce. Válcová dutina – kontejner slouží k vedení polotovaru a pro jeho zavádění je opatřena zaoblením nebo náběhovým kuzelem. Výška kontejneru je dána geometrií polotovaru a průměr redukčního oka je dán výsledným průměrem součásti. Na obr.2.6 je zobrazen tvar upnutí průtlačnice jedinou objímkou – bandáží z důvodu vyšší únosnosti průtlačnice. Vzájemná montáž průtlačnice a objímky může být provedena buď nahřátím objímky, kde se zvětší její vnitřní průměr takovým způsobem, abychom mohli průtlačnici volně vložit do objímky, nebo využijeme kuželového povrchu stykových ploch průtlačnice a objímky, a průtlačnici do objímky zalisujeme. Ve většině případů se setkáme se druhým způsobem montáže. Obr 2.7 zobrazuje příčně dělenou průtlačnici, která přechází z válcové části na kuželovou, což má za následek snižování vrubových účinků.



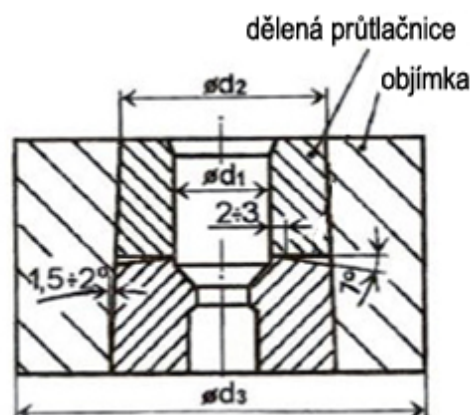
Obr.2.5průtlačnice pro dopředné protlačování[3]

$T_{\text{tváření}}$	20°
ϕD_4	$D_3 + (0,1 \text{ až } 0,2)$
h	$0,5 \sqrt{D_3}$
2α	$30^\circ \text{ až } 90^\circ$
R_1	$(D_1 - D_3) / 2$
R_2	$(0,05 \text{ až } 0,1) D_3$
R_3	$0,15 D_1$
h_2	$\min 0,7 D_1$
γ	$1^\circ \text{ až } 2^\circ$
β	$5^\circ \text{ až } 10^\circ$

tab.2.1: geometrické parametry průtlačnic [3]



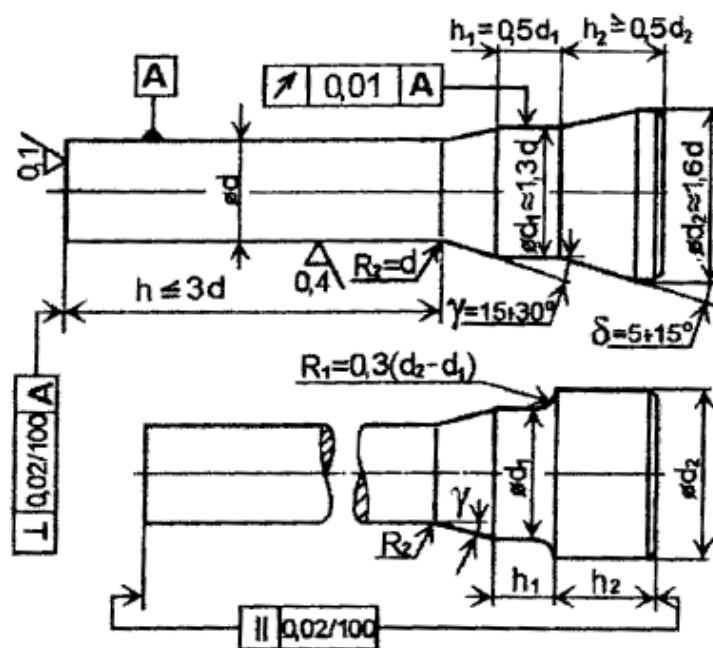
Obr.2.6: průtlačnice s objímkou [3]



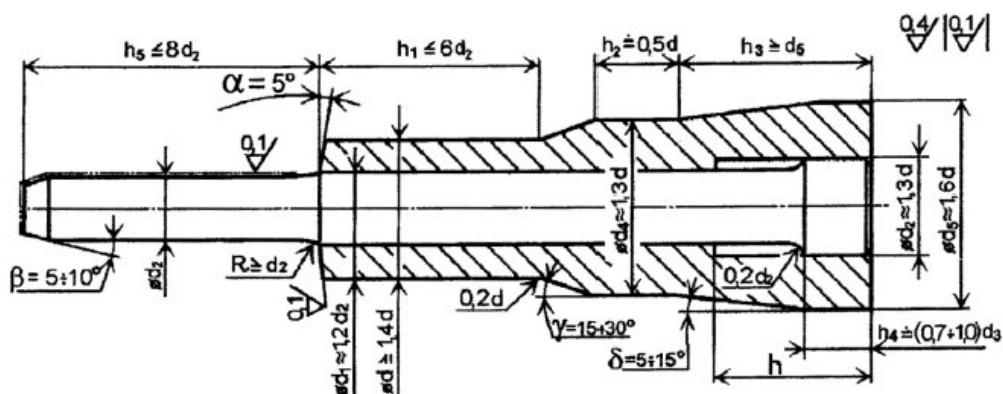
Obr.2.: příčně dělená průtlačnice s jednou objímkou [3]

Průtlačníky pro dopředné protlačování

Průtlačníky mohou být vyrobeny z jednoho kusu nebo se mohou vyrobít jako dělené na pouzdro a samotný průtlačník. První jmenovaný se využívá pro dopředné protlačování plných těles a je důležité u něj dbát na přechod mezi funkční částí (dříkem) a upínací částí, z důvodu možné koncentrace napětí a následnému zničení nástroje. Proto se doporučuje volit pozvolný přechod mezi těmito dvěma částmi. Upínací část průtlačníku může být buď s kuželovou, nebo válcovou hlavou. V neposlední řadě je potřeba neopomenout geometrické tolerance jako např. kolmost, házivost, rovnoběžnost a konečné opracování plochy. Dělené průtlačníky se využívají nejčastěji pro duté protlačování.



obr.2.8: tvar průtlačníku pro protlačování plných součástí [3]

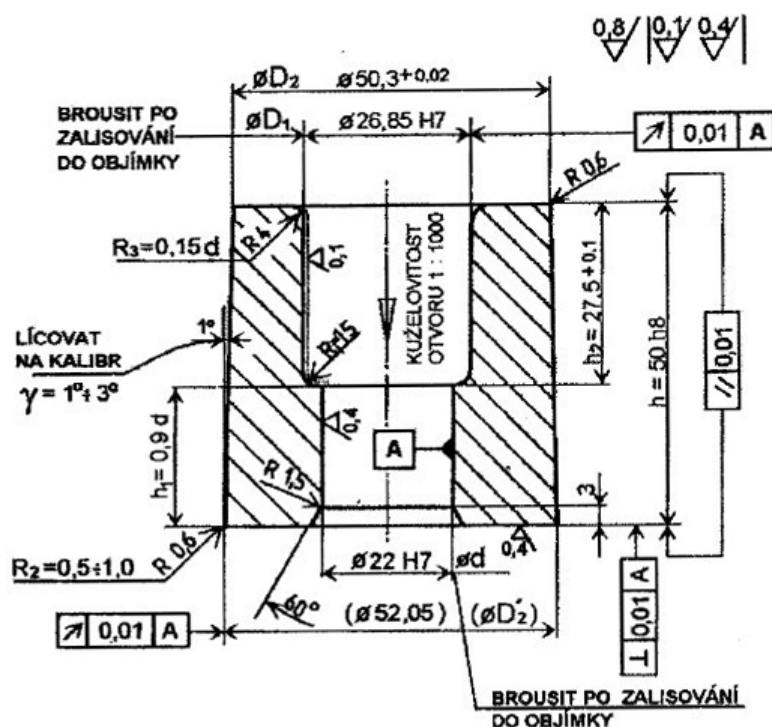


obr.2.9: tvar průtlačníku pro duté protlačování [3]

2.2.2 Charakteristiky nástrojů pro zpětné protlačování [3], [10]

Průtlačnice pro zpětné protlačování

Vstup do pracovní dutiny průtlačnice pro zpětné protlačování je buď zaoblen, nebo obsahuje kuželový náběh pro lepší vedení polotovaru podobně jako u dopředného protlačování. Důležitým geometrickým prvkem je zaoblení uvnitř dutiny, které zabraňuje koncentraci radiálního napětí. Dutina průtlačnice se vyrábí s malou kuželovitostí, která zabraňuje vzniku velkých sil při konečném vyhazování hotových součástí. Povrch vnitřní dutiny je broušen a lapován. Pomocí jedné nebo více objímk lze předpětím zvyšovat únosnost průtlačnic. V případě složených průtlačnic se montáž provádí zalisováním na kuželovou plochu případně se průtlačnice podchladí.



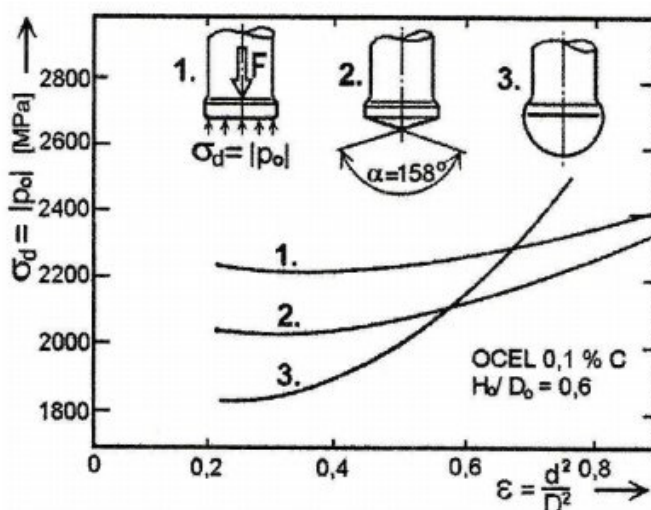
Teplota tváření °C	Uložení průměru vyhazovače
20	H7/f7
200 až 400	H8/f8
400 až 700	H8/e9
700 a víc	H8/e9

tab.2.2: vliv teploty na uložení vyhazovače [3]

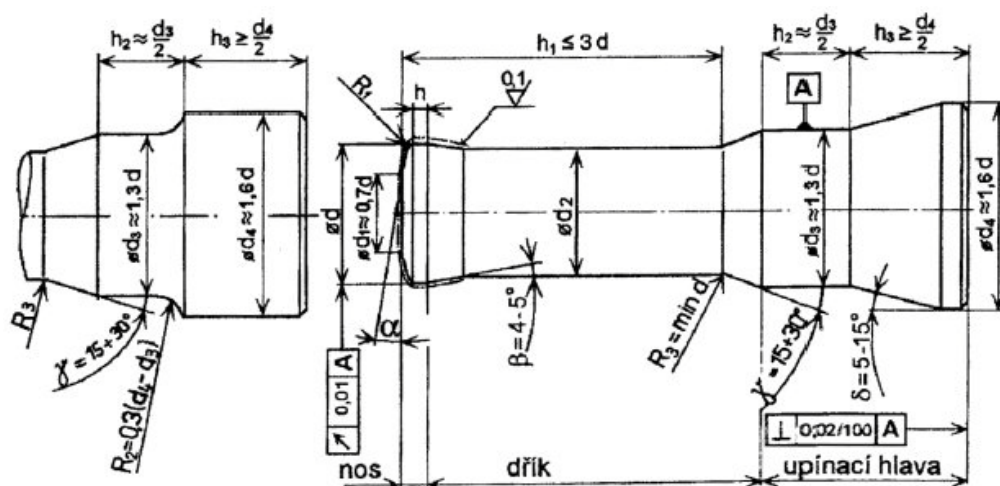
obr.2.10: tvar průtlačnice pro zpětné protlačování [3]

Průtlačníky pro zpětné protlačování

Na velký deformační odpor má největší vliv čelo průtlačníku, konkrétně jeho provedení. Optimální tvar čelní plochy je závislý na teplotě protlačování při volbě vhodného úhlu kuželovité části a volí se s ohledem na výchozí rozměry a konečnou geometrii výlisku. Snížením tření mezi nástrojem a tvářeným dílcem se dosáhne odlehčením průtlačníku fazetou v oblasti čela průtlačníku. Nejčastější provedení průtlačníku bývá s kuželovým čelem, které dobře roztírá vrstvu maziva po povrchu výlisku. Vliv tvaru čela průtlačníku na deformační odpor v závislosti na poměrné deformaci průtlačku je vidět na obr.2.11.



obr. 2.11: vliv tvaru čela nástroje na deformační odpor [3]



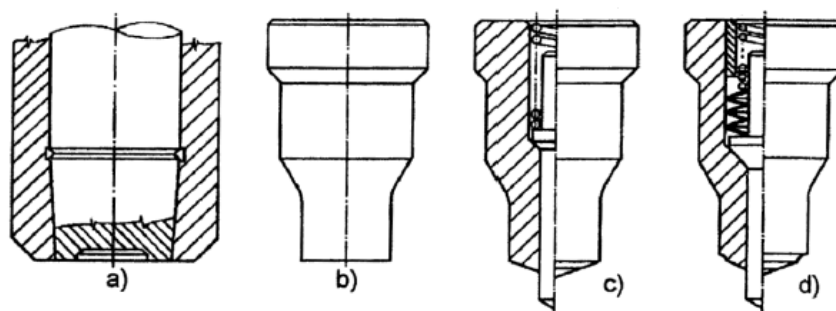
obr.2.12: tvar průtlačníku pro zpětné protlačování [3]

	Teplota zpětného protlačování			
	20°	200° až 400°	400° až 700°	700° a více
ϕd	$d-(0,1 \text{ až } 0,2)$	$d-(0,2 \text{ až } 0,5)$	$d-(0,3 \text{ až } 0,6)$	$d-(0,4 \text{ až } 1,0)$
h	$0,5 \sqrt{d}$	2 až 3 mm	3 až 5 mm	5 až 20 mm
α	5 až 8°	5 až 15°	5 až 15°	20°
R_1	$(0,05 \text{ až } 0,1)d$	1 až 3 mm	1 až 4 mm	2 až 10 mm
d_1	$d-(2 R_1 + 0,2d) \approx 0,7d$			

tab.2.3: Geometrické parametry průtlačníků [3]

2.2.3. Nástroje pro pěchování [3]

Největší vliv na geometrii a tvar pěchovníku má technologický postup výroby zadané součásti a typ tvářecího stroje. Na základě toho rozlišujeme dva druhy pěchovníků. První pro předpěchování výchozího materiálu před následující tvářecí operací a druhý pro napěchování žádaného tvaru. Tvary pěchovníků jsou vidět na obr. 2.13.



Obr.2.13: a) vložkový pěchovník b) pěchovník s rovným čelem c), d) pěchovník pro zahloubení [3]

2.3. Požadavky na nástroje pro objemové tváření za studena [1], [2], [3], [8], [14]

Zásady pro konstrukci nástrojů:

- Tuhost nástroje a rozměrová stálost, která ovlivňuje přesnost výlisku a životnost aktivních částí nástroje
- Vedení aktivních částí nástroje, kdy je průtlačník třeba soustředně vést ve vodícím pouzdru pro zajištění souososti před dotykem čela průtlačníku s polotovarem
- Jednoduchost montáže nástrojů a rychlá výměna funkčních částí nástroje
- Spolehlivé vyhazování protlačku z průtlačnice pomocí vyhazovacího mechanismu a jeho stírání
- Dokonalé mazání a chlazení aktivních částí a odstraňování otřepů z dutin nástroje
- Dodržení maximálního stupně deformace
- Odvzdušnění nástroje v místech, kde hrozí nebezpečí vzniku vzduchových polštářů

Materiály nástrojů

V průběhu tvářecího procesu jsou nástroje vystaveny velkému rozsahu namáhání v tahu, tlaku a v neposlední řadě i v ohybu. Mohou být vystaveny cyklickému dynamickému namáhání, což nepříznivě působí zejména na životnost nástroje. Výsledkem je porušení nástroje únavovým lomem. Cílené životnosti je možno dosáhnout správnou volbou materiálu, účinným mazáním tak, aby nedocházelo k porušení opotřebením, správnou konstrukcí nástroje, vhodně zvoleným technologickým postupem a velikostí sériovosti.

Požadavky na materiály nástrojů pro objemové tváření za studena jsou velmi vysoké a je třeba zaručit tyto vlastnosti:

- odolnost proti opotřebení
- vysoká pevnost a tvrdost
- dobrá obrobiteľnosť
- dostatečná houževnatost
- vysoká popouštěcí teplota
- rozměrová stálost

Pro nástroje na objemové tváření se nejčastěji doporučuje volit nástrojové oceli (nejčastěji třídy 19) podle druhu materiálu, jenž se bude protlačovat a podle charakteru protlačování (zpětné, dopředné, kombinované), dále podle velikosti deformace a tvaru součástí. Cílem je dosáhnoutí martenzitické struktury, která obsahuje rozptýlené jemné karbidy tvořené legujícími prvky. Jde především o křemík, chrom, wolfram, vanad, mangan apod.

Nejdůležitější proces při výrobě nástroje je tepelné zpracování, které má vliv na konečné vlastnosti nástroje. Nejprve se materiál normalizačně žíhá, aby došlo ke změně struktury a zjemnění zrna. Poté se materiál kalí s rychlým ochlazením nadkritickou ochlazovací rychlostí, aby nevznikla tvrdá martenzitická struktura. Nástrojové oceli jsou po kalení křehké a náchylné k praskání z důvodu vnitřního pnutí, proto po kalení následuje vícenásobné popouštění pro zvýšení houževnatosti a snížení tvrdosti. Teploty kalení a popouštění se v závislosti na čase volí na základě chemického složení nástroje. Nástroje lze poté ještě žíhat z důvodu zbytkových napětí v materiálu. Pro nástroje maximálně namáhané nebo při výrobě větších sérií se doporučuje upravovat povrchy buď iontovou nitridací nebo fyzikálním

iontoplazmovým povlakováním nitridem titanu TiN. Pro velká namáhání je možno také zvolit za materiál slinutý karbid, jenž se vyznačuje velkou tvrdostí a životností. Často využívané jsou slinuté karbidy wolframu a kobaltu. Ve srovnání s ocelí mají větší pevnost v tlaku a nižší pevnost v ohybu a tahu

tab.2.4: Přehled materiálů protlačovacích nástrojů [8]

Součást protlačovadla			Materiál
Průtlačník			19 314, 19 315, 19 426, 19 550, 19 569, 19 572, 19 820, 19 830
Průtlačnice			19 436, 19 550, 19 569, 19 572, 19 655, 19 735, 19 820, 19 830
Objímka	Jednoduchá		19 550, 19 740 tepelně zpracováno na 45 až 48 HRC
	Dvojitá	Vnitřní objímka	19 550 tepelně zpracováno na 52 až 55 HRC 19 655 tepelně zpracováno na 50
		Vnější objímka	15 261 tepelně zpracováno na 40 až 45 HRC; pro objímky větších rozměrů při požadavku větší houževnatosti 19 426 tepelně zpracováno na 40 až 45 HRC
Vyhazovač			19 314, 19 569, 19 820, 19 830
Kolík vyhazovače			19 314, 19 426, 19 550
Opěrná deska a podložka, vodící vložka			19 314, 19 356, 19 550; pro nejvyšší tlaková namáhání 19 436
Těleso protlačovadla, matice			11 600, 11 700, 12 060, 13 180, 14 260 tepelně zpracováno na 40 až 45 HRC

Poznámky

1. Ocel 19 655 lze doporučit jen pro rozměrnější průtlačnice s hlubokými dutinami.
2. Oceli 19 820 a 19 830 se doporučují pro nástroje maximálně namáhané nebo při výrobě větších sérií.

2.4. Požadavky na materiály vhodné k objemovému tváření [1], [2], [6]

Pro objemové tváření lze použít všech kovových materiálů, jenž jsou schopny plastické deformace. Ocel je nejčastěji využívaným materiálem pro tváření, především pak nízkouhlíkové a nízkolegované oceli. Svými mechanickými vlastnostmi vyhovují objemovému tváření i neželezné kovy. Používané materiály jsou např. hliník a jeho slitiny, měď a jeho slitiny apod. V tab.2.5 jsou uvedeny oceli používané k protlačování za studena. Pro zjištění tvařitelnosti oceli se využívá pěchovacích zkoušek. Během těchto zkoušek lze získat důležité charakteristiky z tvářecího procesu jako např. přirozený přetvárný odpor, technologický přetvárný odpor, pěchovatelnost, kovatelnost apod.

2.4.1. Vlastnosti ocelí pro objemové tváření [1], [2], [10],

Mechanické vlastnosti:

U ocelí se nejčastěji požaduje nízká mez kluzu, vysoká tažnost a vysoká kontrakce (vyšší než 55%), která slouží jako spolehlivý ukazatel plasticity. Pokud klesne hodnota pod 50%, objevuje se riziko vzniku trhlin a je potřeba plasticitu obnovit. Zásobu plasticity je možno zjistit z poměru meze kluzu ku mezi pevnosti. Tento poměr by měl být v rozmezí 0,5-0,6

Vnitřní struktura a tepelné zpracování:

Požadovaná struktura oceli pro objemové tváření za studena je feriticko-perlitická s globulárním perlitem. Výchozí materiál je obvykle normalizačně žhán pro rovnoměrnost zrn, kde je dosaženo lepší příčné vrubové houževnatosti. Žhání je provedeno za ohřevu nad teplotou A_{C3} a následným vychladnutím na klidném vzduchu. Následným žháním na měkko dosáhneme velké tvárnosti materiálu. Je-li potřeba mezioperační žhání, jde o žhání rekrytalizační, které odstraní deformační zpevnění způsobené předcházející tvářecí operací za studena. Při tomto pochodu dochází k tvoření zárodků nových zrn s podstatně menším množstvím mřížkových poruch. Výsledkem je nová struktura materiálu, kdy jsou zrna souměrná a nevykazují prodloužení ve tvářecím směru. Pro snížení vnitřního pnutí z průtláčku je využíváno žhání k odstranění pnutí, které se provede ohřevem na teplotu pod A_{C1} , většinou pod teplotou 550°C a poté se pomalu ochlazuje.

Chemické složení:

V praxi jsou nejvhodnější oceli pro protlačování do obsahu uhlíku zhruba 0,45%. Se vzrůstajícím obsahem uhlíku a legujících prvků (Si, Mn) roste deformační odpor, klesá tvárnost a vzrůstá pevnost materiálu. Fosfor a síra, která v oceli snižuje houževnatost, a tím pádem způsobují křehkost, představuje škodlivou příměs. Snahou je nízký obsah nekovových vměstků, které se v oceli nerozpustí. Příkladem může být FeS, který vznikne sloučením železa a síry. Mezi další nežádoucí prvky v oceli patří také kyslík. Mezi žádoucí prvky řadíme Ni, V, Al, jenž zlepšují tvárnost oceli.

tab.2.5: Přehled ocelí používaných k protlačování [6]

Oceli ČSN	Chemické složení							Tvárnost oceli
	C	P _{MAX.}	S _{MAX.}	P+S	Mn	Si	Cr	
11 340	0,10	0,05	0,05					Oceli s vysokou tvárností
11 370	0,15	0,05	0,05					
12 010	0,13	0,04	0,04	0,07	0,6			
12 013	0,07	0,03	0,03	0,05	0,3	0,35		
11 420	0,22	0,05	0,05					Oceli se střední tvárností
11 424	0,20	0,05	0,05					
11 456	0,22	0,05	0,05					
12 020	0,20	0,04	0,04	0,07	0,9	0,35		
14 120	0,18	0,04	0,04	0,07	0,6	0,35	0,9	
14 220	0,19	0,04	0,04	0,07	1,4	0,35	1,1	
11 500	0,28	0,06	0,06	0,1				Tvrdé oceli pro protlačování s malou tvárností
11 600	0,43	0,06	0,06	0,1				
12 040	0,04	0,04	0,04	0,07	0,8	0,35		
12 050	0,50	0,04	0,04	0,07	0,8	0,35		

2.4.2. Příprava materiálu pro protlačování [1], [2], [6], [11]

Výchozím polotovarem při protlačování oceli jsou většinou části tyčovitěho charakteru. Tyče přicházející ke zpracování jsou většinou připravené k výrobě v nevyhovujícím stavu. Materiál se většinou upravuje následovně: rovnání tyčí, lapování, dělení, tepelné zpracování, odstranění okují a nečistot, fosfatizace a sušení, mazání.

Příprava zahrnuje tyto technologické operace:

Příprava polotovaru:

Výchozí polotovar je oddělen o daném průřezu s největší úsporností materiálu z hutního polotovaru, nesmí vykazovat vnitřní vady jako jsou trhliny, bubliny, vměstky, zaválcované okuje a další, které by ovlivnily jakost hotového výrobku. Pro tváření se využívají tažené, loupané nebo kalibrované tyče. Loupané tyče se zpracovávají na strojích, které obsahují loupací hlavu s noži, jenž se posouvá a otáčí. Tyč prochází hlavou, je vedena vodícími kladkami a nože její povrch hladce a přesně obrobí. Jde tak o rychlejší způsob než soustružení. Tvar polotovaru může být buď plný špalík kruhového průřezu, kde výška špalíku je zpravidla větší než polovina průřezu, nebo kaloty kruhového průřezu u nichž je jejich výška mnohem menší než vnější rozměr. Špalíky s průchozím otvorem jsou obdobou plných špalíků. Polotovar může mít i tvar prstence kruhového, obdélníkového, oválného i jiného průřezu.

Dělení polotovaru:

Dělení probíhá na kotoučových pilách nebo přímo v nástroji, kdy je materiál uštěpen tvarovými noži. Nevýhodou odštěpení jsou malá deformační zpevnění povrchu špalíku. Při řezání dosáhneme přesných rozměrů a stálosti rozměru bez nezpevněného povrchu špalíku. Snížení produktivity a přebytný odpad jsou v tomto případě velkou nevýhodou. Obvykle je nutno špalíky zbavit ostrých hran odjehlením.

Povrchová úprava:

Výchozí polotovar obsahuje mnoho povrchových vad, které dělají potíže během tvářecího procesu. Tato příprava spočívá v důkladném odmaštění a očištění povrchových vad (tryskáním, broušením). Dalším procesem úpravy polotovaru je fosfátování, které vytvoří nosný povrch pro mazivo. Fosfátovaná vrstva je pórovitá a dobře ulpívá na povrchu polotovaru. Do svých pórů nasaje mazivo, které odolává vysokým tlakům během protlačování. Vytváří tak mezi nástrojem a průtláčkem kluznou vrstvu, která zabezpečuje tok materiálu. Nanášení spočívá v ponoření polotovaru do fosfatizační lázně, nebo nastříkání fosfatizačním roztokem. Pro velké namáhání protlačků se využívají vrstvy povlaků např. z cínu, olova, zinku nebo mědi.

Mazání:

Nanášením vrstvy maziva snižujeme vliv tření na deformační odpor materiálu během procesu tváření. Je prováděno ponořením do organického oleje, mýdlových emulzí nebo tuku.

Tření ve tvářecím procesu výrazně ovlivňuje kvalitu výrobku a ekonomičnost výroby. S rostoucím třením se zvyšuje množství vynaložené energie potřebné k přetvoření materiálu. Volbou vhodného maziva mezi materiálem a nástrojem lze snížit třecí odpor tak, aby bylo

opotřebení nástroje co nejmenší. Účelem mazání je zabránění zadření nástroje a vznik studených svarů a třecích ztrát.

Maziva lze rozdělit jako:

- Oleje – mohou být buď minerální, nebo syntetické
- Mýdlové emulze – nejpoužívanější je stearát sodný, který se nanáší ponorem polotovaru po fosfátování do mýdlového roztoku. Vznikají reakcí s kovovými oxidy na povrchu kovů a zajišťují odolnost proti vysokým tlakům.
- Pevná maziva – např. grafit, který se používá v disperzi s vodou nebo olejem, nebo sirník molybdeničitý MoS_2 , jenž se využívá do tvářecích teplot 400°C .
- Vodní emulze – používají se při nízkých nárocích na mazání a vyšších nárocích na chlazení při rychlých tvářecích procesech.

Drsnost povrchu průtlačníku a průtlačnice závisí také na velikosti třecích sil a na jejich opotřebení ve funkčních částech. Díky neustálému zvyšování hospodárnosti a produktivity výroby vznikl vědní obor, jenž se zabývá problematikou opotřebení, mazání a tření – tribologie.

2.5. Technologičnost výroby objemovým tvářením [1], [2], [10], [12]

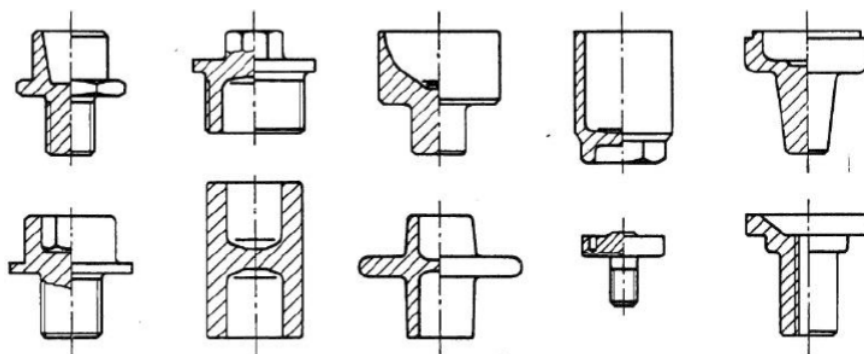
Všeobecné zásady při navrhování součástí

Při návrhu součásti musíme dbát na určité zásady pramenící převážně z experimentálních zkoušek. Jde například o výskyt náhlých přechodů nebo změn příčného průřezu, ostrých hran a rohů, které zhoršují zatečení kovu nebo jeho nesymetrickému nahromadění. Ostré hrany se snažíme zaoblit nebo nahradit vhodnou kuželovitostí tvaru. Součásti kalíškovitého tvaru je třeba posoudit ze závislosti tloušťky dna vzhledem k tloušťce stěny, zda dojde k výskytu ostrých hran. Bude-li tloušťka dna menší než tloušťka stěny, dojde k porušení materiálu v rozích tělesa. Otvary menší jak 10 mm by neměly být protlačovány, rovnoběžnost stěn výlisku by měla korespondovat se směrem pohybu nástroje. Rozměr součásti pro protlačování není nijak omezen, ale je třeba uvažovat s měrným tlakem nástroje, silou a dráhou a tedy i velikostí tvářecího stroje.

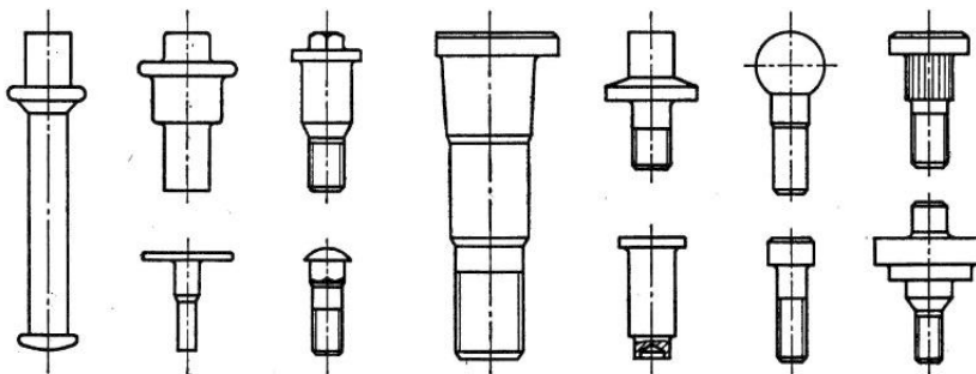
Technologičnost tvaru

Objemovým tvářením lze zhotovit tělesa symetrického, nesymetrického, jednoduchého i složitějšího tvaru. Symetrická tělesa můžeme rozdělit na plná nebo dutá a lze je dále dělit do následujících skupin tvarů:

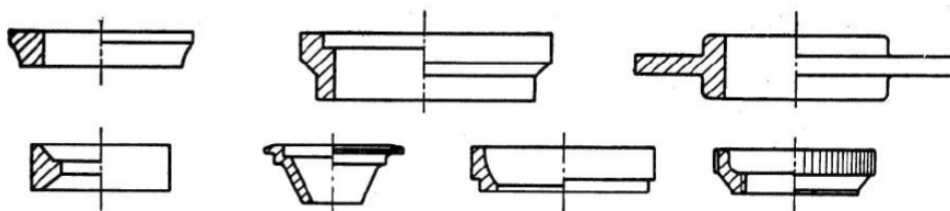
- Součásti kalíškovitého tvaru [2]



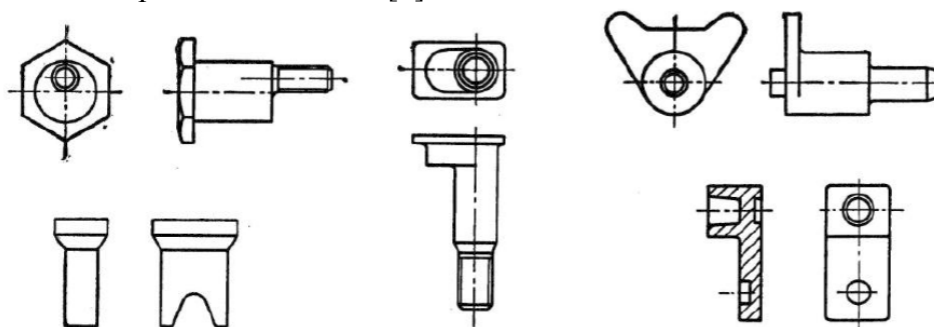
- Součásti čepového tvaru [2]



- Nízké rotační součásti s otvorem [2]

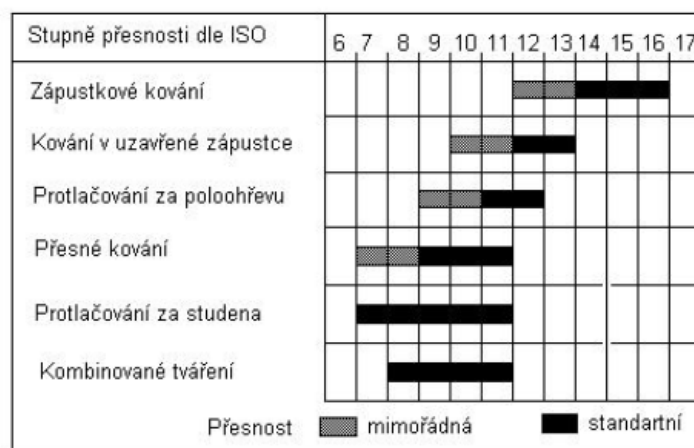


- Součásti nepravidelného tvaru [2]



Jakost povrchu a rozměrová přesnost

V objemovém tváření za studena můžeme dosáhnout velmi kvalitního povrchu součásti, jenž se vyrovná broušenému. Velmi zde záleží na kvalitní povrchové úpravě polotovarů. Jde zejména o moření, fosfátování a mazání. Rozhodující vliv na jakost mají činné části nástrojů, které jsou ve styku s tvářeným materiálem. Pracovní plochy nástrojů pro tváření se brousí na drsnost povrchu $Ra\ 0,2\mu m$ a pak se leští, případně lapují. Protože tak vynikají jakostním hladkým povrchem, což se v provozu projevuje na jejich odolnosti proti otěru. U protlačků se většinou dosahuje tolerancí rozměrů, odpovídajícím stupněm přesnosti IT 8 až IT 10. O jeden stupeň se může zvýšit přesnost výlisků, zařadíme-li do procesu výroby součásti ještě další kalibrovací operace. Délkové rozměry protlačků není doporučeno tolerovat, protože jsou ovlivněny přesností přípravy polotovaru.



Obr.2.14 : stupně přesnosti dle ISO pro jednotlivé technologie výroby[12]

2.6. Stroje pro objemové tváření [3]

Jako hlavní ukazatele při volbě tvářecího stroje pro objemové tváření slouží tvářecí síla, tvářecí práce a výrobní série daného dílce. Celková vypočítaná tvářecí síla nesmí překročit jmenovitou tvářecí sílu používaného stroje, aby nedošlo k jeho přetížení. Tvářecí práce slouží k ověření zatížitelnosti pohonu lisu, zejména setrvačníku a hnacího elektromotoru.

Pro objemové tváření za studena lze využít následující typy strojů:

- Mechanické lisy lze využít především pro velké výlisky o malém počtu postupových operací. Jedná se maximálně o dvě tvářecí operace a je zde nutná přítomnost zabezpečovacích systémů proti přetížení. Řadíme sem zejména klikové, kolenové a výstředníkové lisy.
- Hydraulické lisy jsou vhodné především k protlačování dlouhých rozměrných výlisků za působení velkých tvářecích sil. Mají malý počet zdvihů a malou pracovní rychlost.
- Postupové tvářecí automaty jsou vhodné pro velkosériovou a hromadnou výrobu. Jejich výhodou je vysoká produktivita a možnost využití rovnoměrného zpevnění materiálu přetvořením v několika operacích.

3. POSOUZENÍ SOUČASNÉHO STAVU ŘEŠENÍ [13]

3.1. Materiál pro výrobu součásti

Zadaná součást, jejíž roční výroba činí 250 000 ks, je rotačního symetrického tvaru a její využití je převážně v automobilovém průmyslu jako pouzdro pro vedení ocelové pružiny. Materiál vyrobené součásti bude z oceli 11 320-5R.

Ocel 11 320-5R je ocel obvyklých jakostí vhodná ke tváření za studena. Chemické složení této oceli a základních mechanických vlastností jsou uvedeny v tab.3.1 a tab 3.2.

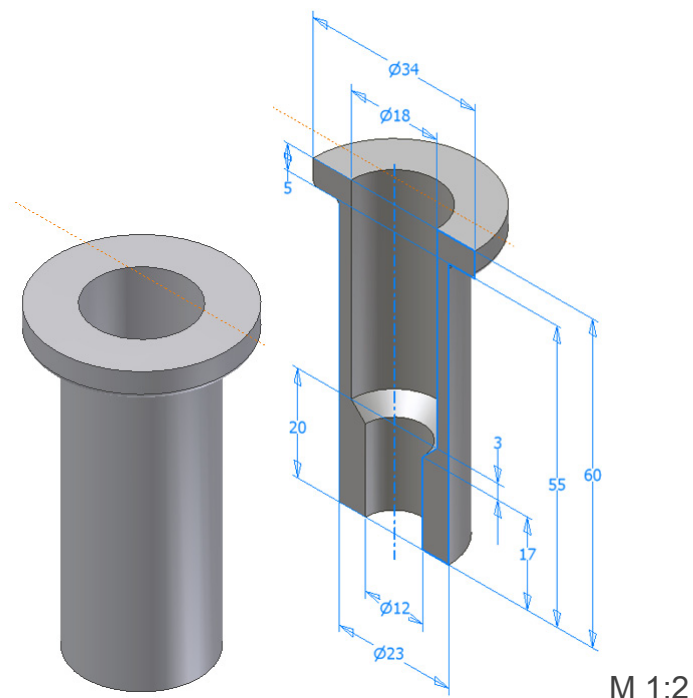
Tab.3.1: Chemické složení oceli 11 320 5R [13]

ČSN	C [%]	P [%]	S [%]
41 1320	max 0,11	max 0,045	max 0,045

Tab.3.2: Mechanické vlastnosti oceli 11 320 5R [13]

Mez kluzu R_{p0,2}	MPa	589
Mez pevnosti R_m	MPa	614
Tažnost A₅	%	15,2
Tvrдость	HV ₁₀	170
Kontrakce Z	%	70,6
Modul pružnosti v tahu E	GPa	201

Detailnější rozbor oceli 11 320-5R je uveden v příloze č.1. Jde o chemické složení, mechanické vlastnosti, strukturu a vyhodnocení tvaru vzorku po Taylorově testu, získané z grantu Ústavu strojírenské technologie, Odboru tváření kovů a plastů na FSI VUT v Brně.



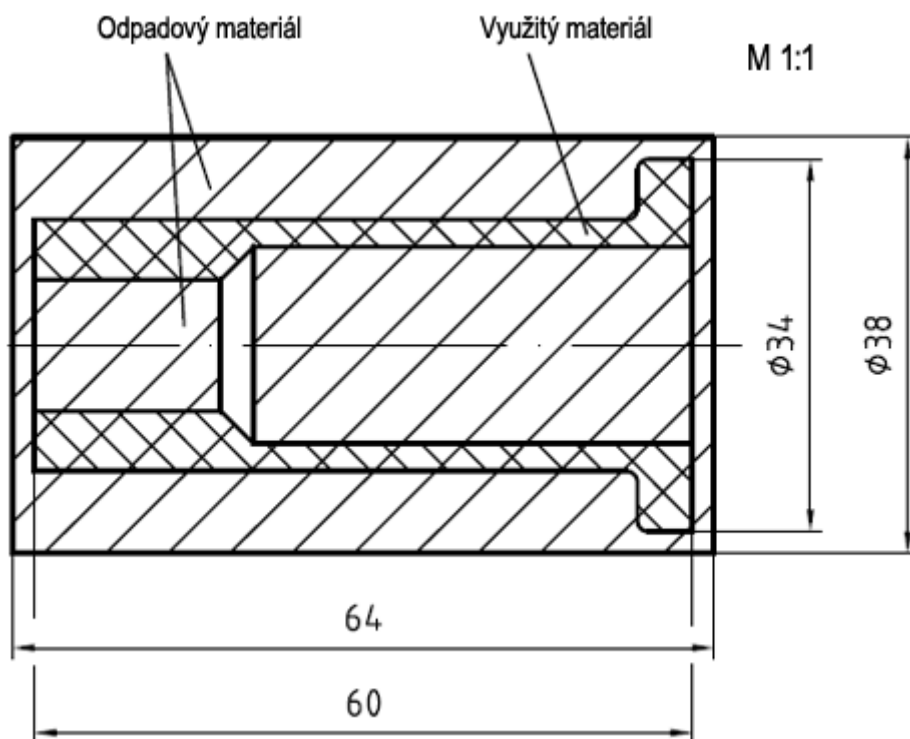
Obr.3.1: Tvar zadané součásti v řezu s rozměry

3.2. Možnosti výroby

K výrobě zadané součásti lze využít i jiné základní výrobní technologie např. třískové obrábění. To je vhodné zejména pro kusovou výrobu, geometricky složitější strojní součásti a v neposlední řadě rozsahem svého využití ve strojírenské výrobě. Výrobní čas, náklady na mzdy a energie na jeden vyrobený kus jsou zde podstatně vyšší, než při využití objemového tváření. Při velkých sériích by vznikl přebytný odpad, jenž by dosahoval hmotnosti jako samotná vyrobená součást. Porušování průběhu vláken při třískovým obráběním má za následek zeslabení oblastí při zvýšeném namáhání součásti, než u zhuštěných vláken v případě objemového tváření součásti. Při obrábění tak nedojde ke zpevnění materiálu, což se může projevit na mechanických vlastnostech, především na pevnosti a tvrdosti.

Objemové tváření vychází ze zákona zachování objemu, kdy objem součásti před a po tváření se nemění. Nevznikají zde ztráty na materiálu způsobené vznikem třísek a další náklady spojené se skladováním kovového odpadu. Koeficient využití materiálu se tak blíží hodnotě 1. Bude dosažena vyšší hodinová produkce s využitím tvářecího automatu než u obráběcího centra a také bude dosažena vyšší životnost nástrojů, než řezné elementy obráběcích nástrojů. Jednou z možných nevýhod objemového tváření je nutnost zhotovení tvarově složitějších součástí na větší počet operací, což by u velkých přetvoření znamenalo začlenění mezi výrobní operace i tepelný ohřev materiálu. Toto by samozřejmě mělo vliv vyšší náklady na celkové zatížení výroby.

Z uvedených výhod a nevýhod obou možných technologií výroby je patrné, že zadaný dílec bude výhodnější vyrábět metodami objemového tváření za studena na tvářecím postupovém automatu v několika krocích s využitím technologie pěchování, dopředného a zpětného protlačování.



Obr.3.2: Spotřeba materiálu při obrábění zadaného dílce

4. NÁVRH TECHNOLOGIE VÝROBY SOUČÁSTI [1], [9], [15], [16]

4.1. Výpočet objemu součásti

Navrhovanou součást rozdělíme na více těles a pro jednotlivá tělesa vypočítáme daný objem. Konečný objem součásti dostaneme součtem všech objemů dílčích těles. Z konečného objemu lze dále vypočítat hmotnost součásti. Přesnější hodnotu objemu součásti lze stanovit i v CAD systému Autodesk Inventor 2009, kde získáme hodnotu $V_c = 15272,8 \text{ mm}^3$, která již uvažuje s přírůstkem objemu blány, jenž bude v poslední operaci oddělena.

$$\text{Objem válce: } V = \frac{\pi D^2 h}{4} \text{ [mm}^3\text{]} \quad (4.1)$$

$$\text{Objem komolého kužele: } V = \frac{\pi h}{3} (r_1^2 + r_1 r_2 + r_2^2) \text{ [mm}^3\text{]} \quad (4.2)$$

$$\text{Objem konečné součásti: } V = \sum V_i = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6 \text{ [mm}^3\text{]} \quad (4.3)$$

Výpočet objemu V_1 :

$$V_1 = \frac{\pi h_1}{4} (D_1^2 - d_1^2) = \frac{\pi \cdot 4}{4} (34^2 - 18^2) = 2613,8 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_2 :

$$\begin{aligned} V_2 &= \left(\frac{\pi D_{12}^2 h_2}{4} - \frac{\pi d_1^2 h_2}{4} \right) + \frac{\pi r^2 2\pi \frac{D_{12}}{2}}{4} = \\ &= \left(\frac{\pi 32^2 1}{4} - \frac{\pi 18^2 1}{4} \right) + \frac{\pi 1^2 \cdot 2\pi \frac{32}{2}}{4} = 628,7 \text{ mm}^3 \end{aligned}$$

Výpočet objemu V_3 :

$$V_3 = \frac{\pi h_3}{4} (D_2^2 - d_1^2) = \frac{\pi \cdot 1}{4} (23^2 - 18^2) = 161 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_4 :

$$V_4 = \frac{\pi h_4}{4} (D_2^2 - d_1^2) = \frac{\pi \cdot 34}{4} (23^2 - 18^2) = 5474,1 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_5 :

$$V_5 = \frac{\pi D_2^2 h_5}{4} - \frac{\pi h_5}{3} \left(\frac{d_1^2}{4} + \frac{d_1 d_2}{4} + \frac{d_2^2}{4} \right) = \frac{\pi 23^2 \cdot 3}{4} - \frac{\pi \cdot 3}{3} \left(\frac{18^2}{4} + \frac{18 \cdot 12}{4} + \frac{12^2}{4} \right) = 709,3 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu V_6 :

$$V_6 = \frac{\pi h_6}{4} (D_2^2 - d_2^2) = \frac{\pi \cdot 17}{4} (23^2 - 12^2) = 5140,1 \text{ mm}^3$$

Konečný objem součásti V_{c0} dle rovnice 3.3:

$$V_{c0} = V_1 + V_2 + V_3 + V_4 + V_5 + V_6$$

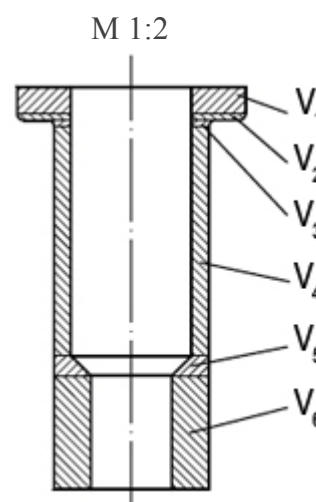
$$V_{c0} = 2613,8 + 628,7 + 161 + 5474,1 + 709,3 + 5140,1 = 14727 \text{ mm}^3$$

Výpočet objemu s přírůstkem objemu blány:

$$V_c = 14727 + 545,6 = \underline{\underline{15272,6 \text{ mm}^3}} \quad (4.4)$$

Výpočet hmotnosti součásti

$$m = \rho \cdot V = \frac{7,8g}{m^3} \cdot 14727m^3 = \underline{\underline{114,87g}} \quad (4.5)$$

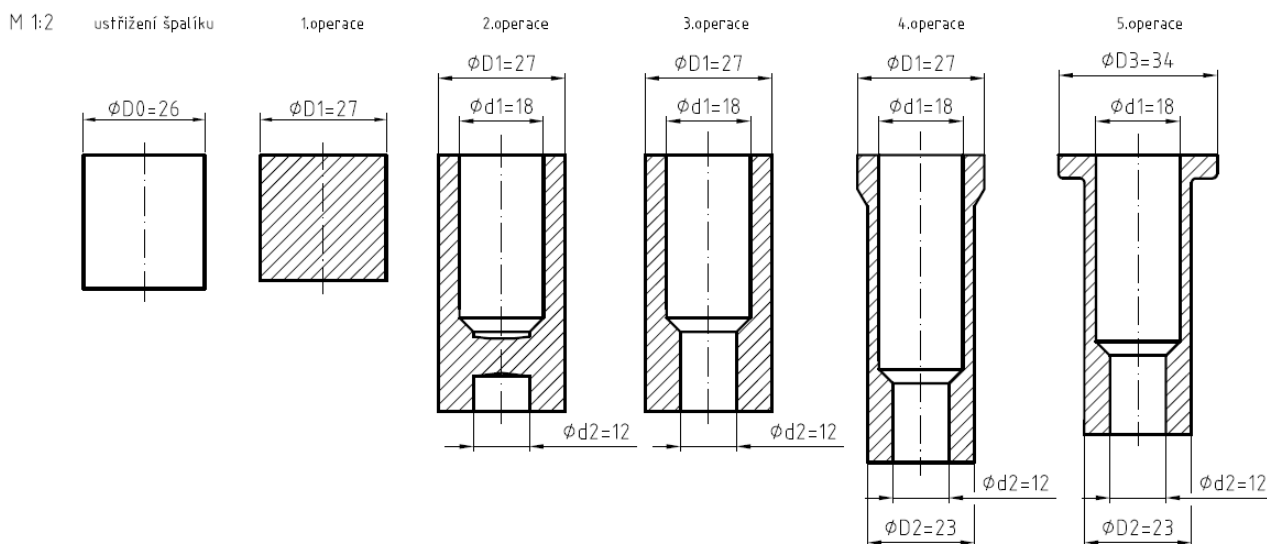


Obr.4.1 : Rozdělení součásti na segmenty

4.2. Technologické varianty výroby

VARIANTA - A

Technologický postup výroby součásti vyplývá z volby výchozího průměru polotovaru. Výchozím polotovarem v této variantě bude špalík o průměru 26mm. Polotovar o daném průměru lze snadno zavést a zpracovat ve zvoleném tvářecím automatu.



Obr.4.2 : Návrh technologie varianty A

Technologický postup:

- Ustřížení špalíku z plné tyče o průměru ϕD_0
- 1.operace:
 - Předpěchování průměru ϕD_0 na průměr ϕD_1
- 2.operace:
 - Zpětné protlačování vnitřního průměru ϕd_1 a ϕd_2
- 3.operace:
 - Stříh blány, která vznikla ve 2.tvářecí operaci
- 4.operace:
 - Dopředné protlačení průměru ϕD_1 na průměr ϕD_2
- 5.operace:
 - Pěchování hlavy na konečný průměr ϕD_3

Výpočet logaritmického přetvoření:

$$\varphi_{hlavy} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{zpet}| + |\varphi_{dopř}| + |\varphi_{pech}| \quad (4.6)$$

$$\varphi_{hlavy} = \left| \ln \frac{27^2}{26^2} \right| + \left| \ln \frac{27^2 - 18^2}{27^2} \right| + \left| \ln \frac{23^2 - 18^2}{27^2 - 18^2} \right| + \left| \ln \frac{34^2 - 18^2}{27^2 - 18^2} \right|$$

$$\varphi_{hlavy} = |0,075| + |-0,587| + |-0,680| + |0,719|$$

$$\varphi_{hlavy} = \underline{\underline{2,061}}$$

$$\varphi_{valce1} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{zpet1}| + |\varphi_{dopř1}| \quad (4.7)$$

$$\varphi_{valce1} = \left| \ln \frac{27^2}{26^2} \right| + \left| \ln \frac{27^2 - 18^2}{27^2} \right| + \left| \ln \frac{23^2 - 18^2}{27^2 - 18^2} \right|$$

$$\varphi_{valce1} = |0,075| + |-0,587| + |-0,680|$$

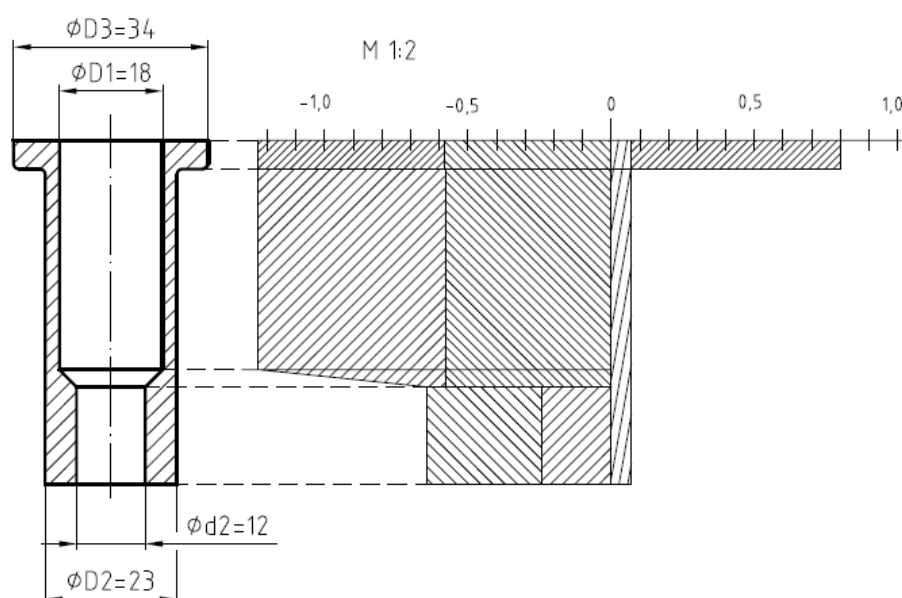
$$\varphi_{valce1} = \underline{\underline{1,341}}$$

$$\varphi_{valce2} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{zpet2}| + |\varphi_{dopř2}| \quad (4.8)$$

$$\varphi_{valce2} = \left| \ln \frac{27^2}{26^2} \right| + \left| \ln \frac{27^2 - 12^2}{27^2} \right| + \left| \ln \frac{23^2 - 12^2}{27^2 - 12^2} \right|$$

$$\varphi_{valce2} = |0,075| + |-0,220| + |-0,418|$$

$$\varphi_{valce2} = \underline{\underline{0,710}}$$

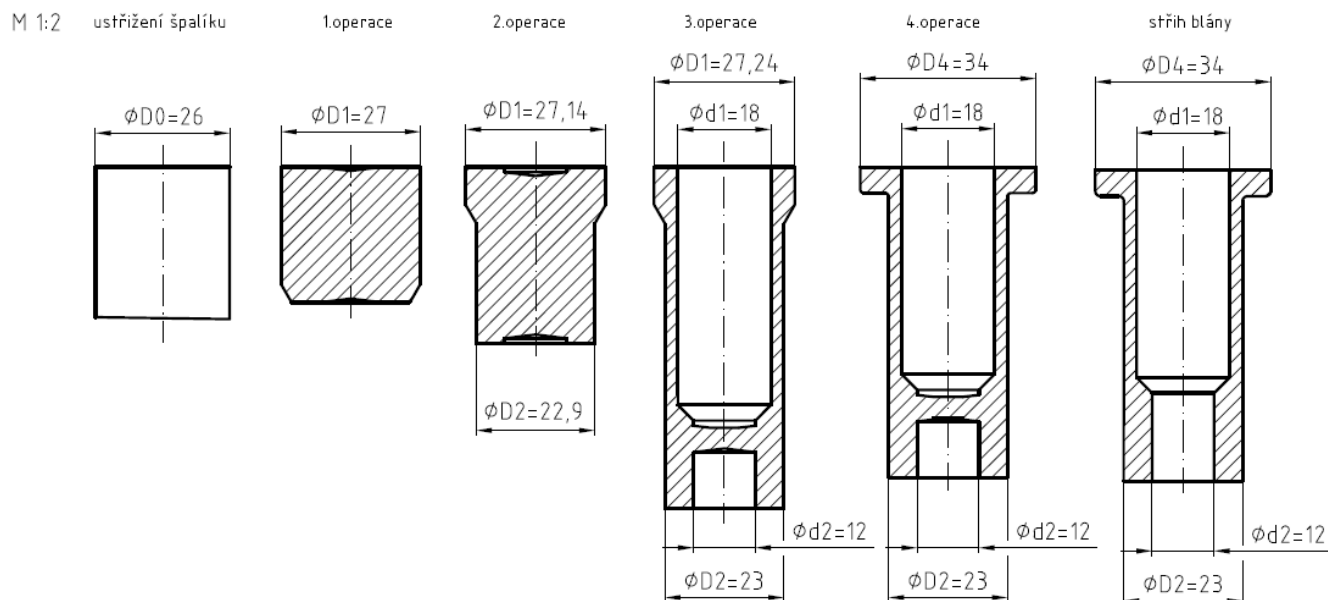


Obr.4.3: Diagram logaritmického přetvoření varianty A

Logaritmické přetvoření není v této variantě rozloženo rovnoměrně. Přetvoření hlavy přesahuje kritickou hodnotu a dosahuje hodnoty 2,06, což je z hlediska výroby součásti nepřijatelné.

VARIANTA B

Výpočet rozměrů polotovaru je proveden na základě zákona zachování objemu, kdy objem součásti před a po tváření se nemění. Technologický postup je navržen tak, aby zpevnění hlavy i dřívku bylo stejné. Tento postup je nejvýhodnější, jelikož nevznikají velké rozdíly u zpevnění hlavy a zpevnění dřívku. Hotová součást má přibližně konstantní zpevnění v celé délce.



Obr.4.4: Návrh technologie varianty B

Technologický postup:

- Ustřížení špalíku z plné tyče o průměru ϕD_0
- 1.operace:
 - Předpěchování průměru ϕD_0 na průměr ϕD_1
- 2.operace:
 - Dopředné protlačování průměru ϕD_1 a ϕD_2
- 3.operace:
 - Zpětné protlačování vnitřních průměrů ϕd_1 a ϕd_2
- 4.operace:
 - Stříh blány, která vznikla ve 3.tvářecí operaci
- 5.operace:
 - Pěchování hlavy na konečný průměr ϕD_4

Výpočet rozměru polotovaru:

$$\varphi_{hlavy} = \varphi_{válce1} \quad (4.9)$$

$$\ln \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_1^2} + \ln \frac{D_4^2 - d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} = \ln \frac{D_1^2}{D_2^2} + \ln \frac{D_2^2}{D_2^2 - d_1^2} \quad (4.10)$$

$$\frac{D_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \cdot \frac{D_4^2 - d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} = \frac{D_1^2}{D_2^2} \cdot \frac{D_2^2}{D_2^2 - d_1^2} \quad (4.11)$$

$$(4.12)$$

$$D_1 = \sqrt{\sqrt{(D_4^2 - d_1^2) \cdot (D_2^2 - d_1^2)} + d_1^2} = \sqrt{\sqrt{(34^2 - 18^2) \cdot (23^2 - 18^2)} + 18^2} = 27,14 \text{ mm}$$

Výpočet logaritmického přetvoření:

$$\varphi_{hlavy} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{pech1}| + |\varphi_{zpet}| + |\varphi_{pech2}| \quad (4.13)$$

$$\varphi_{hlavy} = \left| \ln \frac{27^2}{26^2} \right| + \left| \ln \frac{27,14^2}{27^2} \right| + \left| \ln \frac{27,24^2 - 18^2}{27,14^2} \right| + \left| \ln \frac{34^2 - 18^2}{27,24^2 - 18^2} \right|$$

$$\varphi_{hlavy} = |0,075| + |0,0103| + |-0,579| + |0,700|$$

$$\varphi_{hlavy} = \underline{\underline{1,351}}$$

$$\varphi_{valce1} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{dopř1}| + |\varphi_{valec1zpet}| \quad (4.14)$$

$$\varphi_{valce1} = \left| \ln \frac{27^2}{26^2} \right| + \left| \ln \frac{22,9^2}{27^2} \right| + \left| \ln \frac{23^2 - 18^2}{22,9^2} \right|$$

$$\varphi_{valce1} = |0,075| + |-0,329| + |-0,939|$$

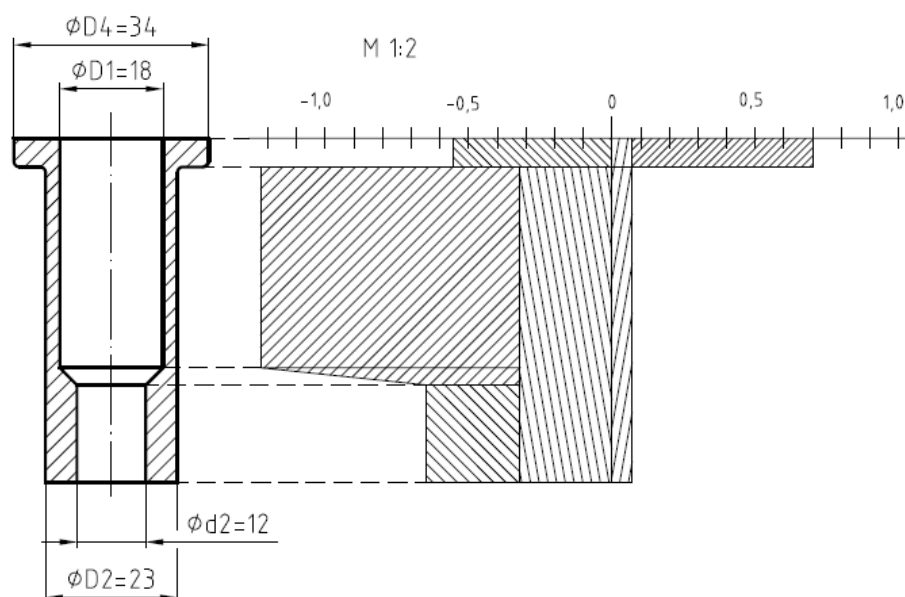
$$\varphi_{valce1} = \underline{\underline{1,343}}$$

$$\varphi_{valce2} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{dopř1}| + |\varphi_{valec2zpet}| \quad (4.15)$$

$$\varphi_{valce2} = \left| \ln \frac{27^2}{26^2} \right| + \left| \ln \frac{22,9^2}{27^2} \right| + \left| \ln \frac{23^2 - 12^2}{22,9^2} \right|$$

$$\varphi_{valce2} = |0,075| + |-0,329| + |-0,309|$$

$$\varphi_{valce2} = \underline{\underline{0,713}}$$

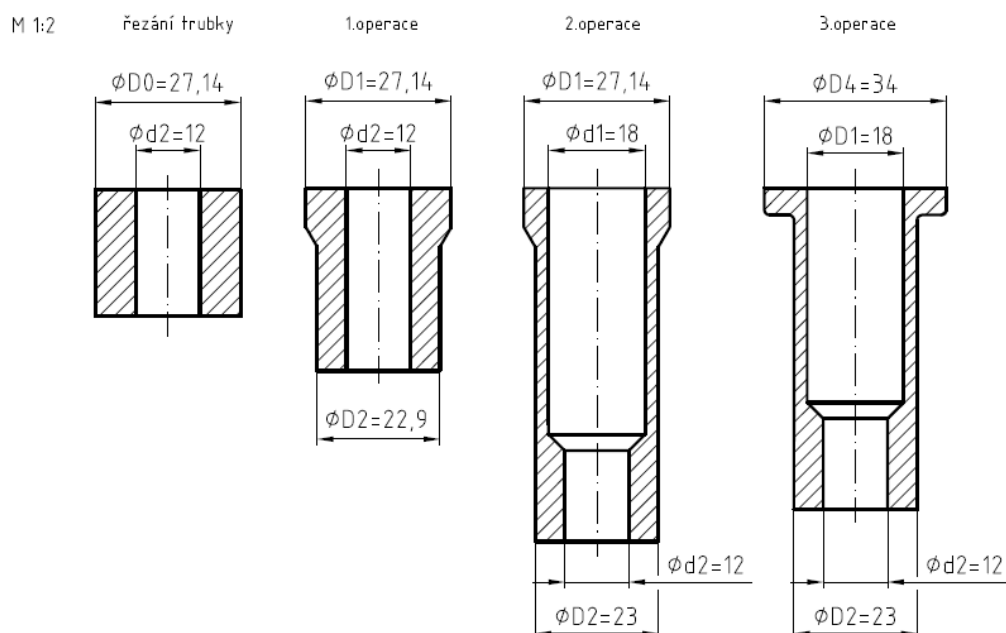


Obr.4.5: Diagram logaritmického přetvoření varianty B

Logaritmické přetvoření je rozloženo v oblasti dříku a hlavy téměř rovnoměrně. Oproti předchozí variantě nedosahuje žádná z přetvoření svých kritických hodnot, a proto je tato varianta výroby součásti přijatelnější.

VARIANTA - C

Polotovarem v této variantě bude trubka o vnitřním průměru 12mm. V poslední operaci tvářecího procesu u této varianty existuje výhoda v podobě absence stříhu blány. Nevýhodou je nákladnější příprava polotovaru, jenž se nebude stříhat ale řezat. Logaritmické přetvoření v hlavě je stejné jako v dříku.



Obr.4.6: Návrh technologie varianty C

Technologický postup:

- Uříznutí trubky o vnějším průměru $\varnothing D_0$ a vnitřním průměru $\varnothing d_2$
- 1.operace:
 - Dopředné protlačování vnějšího průměru $\varnothing D_0$ na průměr $\varnothing D_2$
- 2.operace:
 - Zpětné protlačování vnitřního průměru $\varnothing d_2$ na průměr $\varnothing d_1$
- 3.operace:
 - Pěchování hlavy součásti na průměr $\varnothing D_4$

Výpočet rozměru polotovaru:

$$\varphi_{hlavy} = \varphi_{válce1} \quad (4.16)$$

$$\ln \frac{D_0^2 - d_2^2}{D_0^2 - d_1^2} + \ln \frac{D_4^2 - d_1^2}{D_0^2 - d_1^2} = \ln \frac{D_0^2 - d_2^2}{D_2^2 - d_2^2} + \ln \frac{D_2^2 - d_2^2}{D_2^2 - d_1^2} \quad (4.17)$$

$$\frac{D_0^2 - d_2^2}{D_0^2 - d_1^2} \cdot \frac{D_4^2 - d_1^2}{D_0^2 - d_1^2} = \frac{D_0^2 - d_2^2}{D_2^2 - d_2^2} \cdot \frac{D_2^2 - d_2^2}{D_2^2 - d_1^2} \quad (4.18)$$

$$(4.19)$$

$$D_1 = \sqrt{\sqrt{(D_4^2 - d_1^2) \cdot (D_2^2 - d_1^2)} + d_1^2} = \sqrt{\sqrt{(34^2 - 18^2) \cdot (23^2 - 18^2)} + 18^2} = 27,14 \text{ mm}$$

Výchozím polotovarem je volena trubka o rozměrech $D_0=27,14 \text{ mm}$ a $d_2=12 \text{ mm}$

Výpočet logaritmického přetvoření:

$$\varphi_{hlavy} = |\varphi_{zpet}| + |\varphi_{pěch2}| \quad (4.20)$$

$$\varphi_{hlavy} = \left| \ln \frac{27,14^2 - 18^2}{27,14^2 - 12^2} \right| + \left| \ln \frac{34^2 - 18^2}{27,2^2 - 18^2} \right|$$

$$\varphi_{hlavy} = |-0,362| + |0,693|$$

$$\varphi_{hlavy} = \underline{\underline{1,055}}$$

$$\varphi_{valce1} = |\varphi_{válec1}| + |\varphi_{zpět1}| \quad (4.21)$$

$$\varphi_{valce1} = \left| \ln \frac{22,9^2 - 12^2}{27,14^2 - 12^2} \right| + \left| \ln \frac{23^2 - 18^2}{22,9^2 - 12^2} \right|$$

$$\varphi_{valce1} = |-0,430| + |-0,618|$$

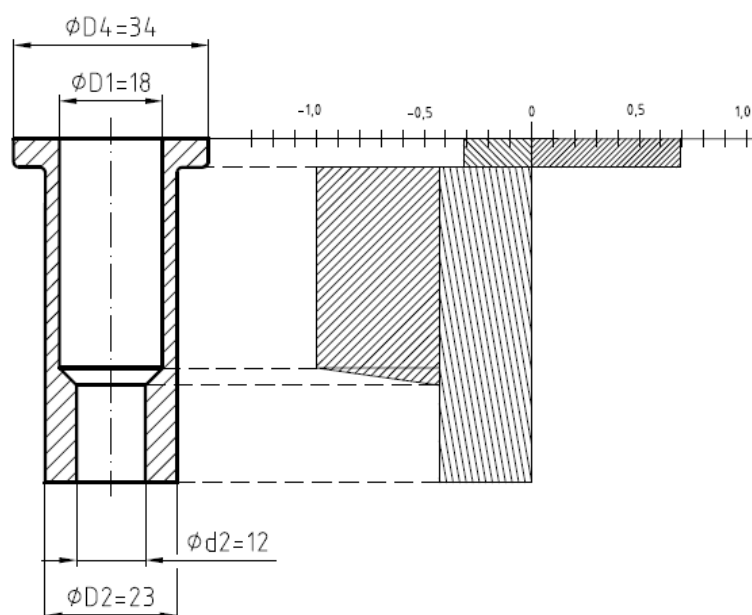
$$\varphi_{valce1} = \underline{\underline{1,048}}$$

$$\varphi_{valce2} = |\varphi_{válec2}| + |\varphi_{zpět2}| \quad (4.22)$$

$$\varphi_{valce2} = \left| \ln \frac{22,9^2 - 12^2}{27,14^2 - 12^2} \right| + \left| \ln \frac{23^2 - 12^2}{22,9^2 - 12^2} \right|$$

$$\varphi_{valce2} = |-0,430| + |0,011|$$

$$\varphi_{valce2} = \underline{\underline{0,441}} \quad \text{M 1:2}$$



Obr.4.7: diagram logaritmického přetvoření varianty C

Díky rovnoměrnému rozložení logaritmického přetvoření v oblasti dříku a hlavy je dosaženo téměř stejných hodnot, ale vzhledem k absenci protlačovaného vnitřního průměru nedochází k většímu zpevnění druhé části dříku.

Celkové zhodnocení variant:

Vhodný návrh technologického postupu výroby by měl zajistit především maximální využití materiálu, dodržení předepsaných rozměrů, požadovaných mechanických vlastností, jakosti povrchu, dosažení maximální životnosti tvářecích nástrojů a ekonomické výroby součásti.

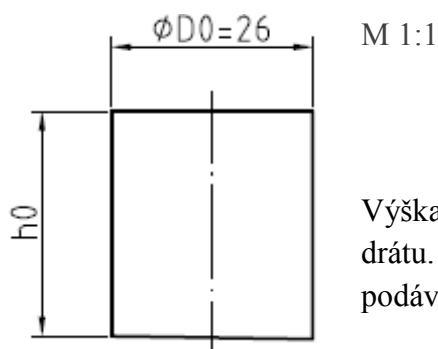
Z navržených variant se jeví jako nejvýhodnější varianta B, jejíž technologický postup se skládá z pěti tvářecích operací. Zpevnění součásti v celém objemu je třeba mít co nejvíce rovnoměrné, což tato varianta splňuje. Při srovnání výsledných přetvoření varianty B a C je zřejmé, že zpevnění hlavy a dříku je prakticky stejné. Nevýhodou poslední varianty je nákladnější příprava výchozího polotovaru, jenž bude dodáván do tvářecího automatu ve formě trubky, nikoli ve formě plné tyče jako v případě první a druhé varianty. Další nevýhodou varianty C je malé zpevnění části dříku v porovnání s variantou B. Výhoda poslední varianty může být v počtu tvářecích operací, kdy k vyrobení součásti lze využít tři operace oproti zbylým variantám. Zcela nevhodnou variantou řešení je varianta A, jenž se skládá z pěti tvářecích operací. Její vysoké nerovnoměrné přetvoření hlavy je z hlediska výroby nepřijatelné.

Jako nejvýhodnější varianta výroby byla zvolena varianta B, na kterou se budou vztahovat další výpočty tvářecích sil a prací spojené s návrhem sestavy postupového nástroje.

4.3. Návrh rozměrů ve všech operacích

Volba rozměrů polotovaru

Průměr špalíku z předpřechování vzešel z předchozích výpočtů, v návaznosti na toto volíme průměr výchozího polotovaru $\phi D_0 = 26\text{mm}$, který lze zpracovat ve zvoleném tvářecím stroji. Pomocí stanoveného objemu součásti lze spočítat výšku špalíku h_0 .



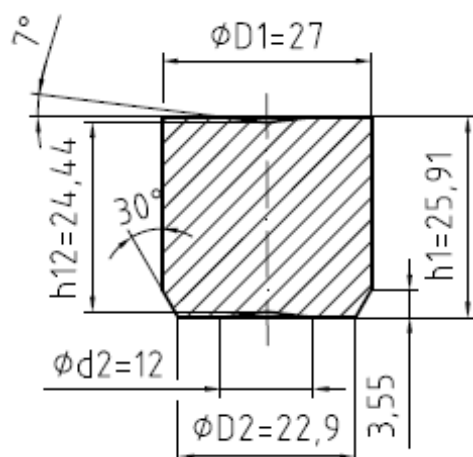
$$h_0 = \frac{4 \cdot V_c}{\pi \cdot D_0^2} = \frac{4 \cdot 15272,8}{\pi \cdot 26^2} = 28,92\text{mm}^3 \quad (4.23)$$

Výška špalíku je volena 29mm z důvodu přesnosti stříhu ze svitku drátu. Polotovar bude fosfatizován a mazán olejem a bude podáván do první operace čelistmi v postupovém automatu.

Obr.4.8: Polotovar tvaru špalíku

Výpočet rozměrů v 1.operaci:

M 1:1



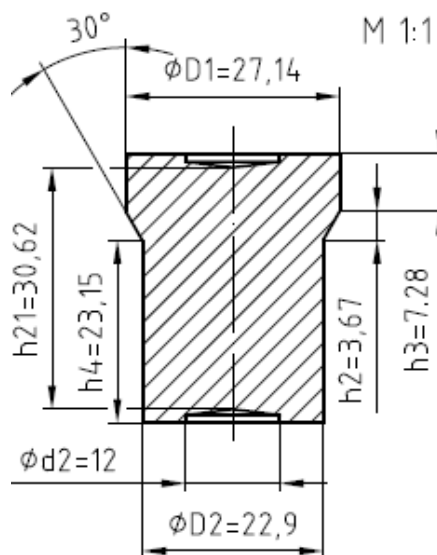
Obr.4.9: Návrh rozměrů v 1.operaci

$$V_C = \frac{\pi}{4} \cdot D_1^2 \cdot h_1 + \frac{\pi}{3} \left(\frac{D_1^2}{4} + \frac{D_1 D_2}{4} + \frac{D_2^2}{4} \right) - 2 \cdot \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{d_2^2}{4} \right)}{2} \cdot \operatorname{tg} 7^\circ \quad (4.24)$$

$$h_1 = \left(15272,8 - \frac{\pi}{3} \left(\frac{27^2}{4} + \frac{27 \cdot 22,9}{4} + \frac{22,9^2}{4} \right) - 2 \cdot \frac{12}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \left(\frac{12^2}{4} \right)}{2} \cdot \operatorname{tg} 7^\circ \right) \cdot \frac{4}{27^2 \cdot \pi}$$

$$h_1 = \underline{\underline{25,91 \text{ mm}}} \quad (4.25)$$

Výpočet rozměrů ve 2. operaci:



Obr.4.10: Návrh rozměrů ve 2.operaci

$$h_2 = \operatorname{tg} \alpha \cdot \frac{D_1 - D_2}{2} = \operatorname{tg} 60^\circ \cdot \frac{27,14 - 22,9}{2} = \underline{\underline{3,67 \text{ mm}}} \quad (4.26)$$

$$V_{12} = V_1 + V_2 = 2613,8 + 628,7 = 3242,5 \text{ mm}^3 \quad (4.27)$$

$$V_{12} = \left[\frac{\pi \cdot h_2}{3} \left(\frac{D_1^2}{4} + \frac{D_1 D_2}{4} + \frac{D_2^2}{4} \right) - \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} \cdot h_2 \right] + \frac{\pi \cdot h_3}{4} (D_1^2 - d_1^2) \quad (4.28)$$

$$3242,5 = \left[\frac{\pi \cdot 3,67}{3} \left(\frac{27,14^2}{4} + \frac{27,14 \cdot 23}{4} + \frac{23^2}{4} \right) - \frac{18^2 \cdot \pi}{4} \cdot 3,67 \right] + \frac{\pi \cdot h_3}{4} (27,14^2 - 18^2)$$

Po úpravě obdržíme velikost výšky h_3 :

$$h_3 = \underline{\underline{7,28\text{mm}}} \quad (4.29)$$

$$V_C = \frac{\pi}{4} \cdot h_3 \cdot D_1^2 + \frac{\pi}{3} \cdot h_2 \cdot \left(\frac{D_1^2}{4} + \frac{D_1 D_2}{4} + \frac{D_2^2}{4} \right) + \frac{\pi}{4} \cdot h_4 \cdot D_2^2 - 2 \left(\frac{\pi}{4} \cdot d_2^2 + \frac{d_2}{2} \cdot \frac{\pi \cdot \frac{d_2^2}{4}}{3} \cdot \text{tg} 7^\circ \right) \quad (4.30)$$

Po úpravě vyjádříme velikost výšky h_4 ze vztahu 3.39 a dosadíme hodnoty do téhož vztahu:

$$h_4 = \frac{4}{\pi \cdot 22,9^2} \cdot \left[15272,8 + 2 \cdot \left(\frac{\pi}{4} \cdot 12^2 + 6 \cdot \frac{\pi \cdot 6^2}{3} \cdot \text{tg} 7^\circ \right) - \frac{\pi}{4} \cdot 7,28 \cdot 27,14^2 - \right. \\ \left. - \frac{\pi}{3} \cdot 3,67 \cdot \left(\frac{27,14^2}{4} + \frac{27,14 \cdot 22,9}{4} + \frac{22,9^2}{4} \right) \right] \\ h_4 = \underline{\underline{23,15\text{mm}}} \quad (4.31)$$

4.4. Výpočet tvářecích sil a prací [13], [15], [16]

Pro výpočet přetvárných odporů je pro daný materiál použita konstitutivní rovnice Johnson-Cook, která při relativně nízkém počtu vstupních parametrů dobře vystihuje reálné chování materiálu. Z rovnice je zřejmá závislost přirozeného přetvárného odporu na logaritmické deformaci, na rychlosti deformace a na teplotě. Proto s rostoucí rychlostí deformace, roste i přirozený přetvárný odpor.

Potřebné parametry pro tuto rovnici jsou v tab.4.1. Z výsledků přirozeného přetvárného odporu jsou stanoveny deformační odpory, na základě kterých jsou určeny tvářecí síly a práce v jednotlivých operacích.

A	450
B	350
C	0,055
n	0,18
m	0,7

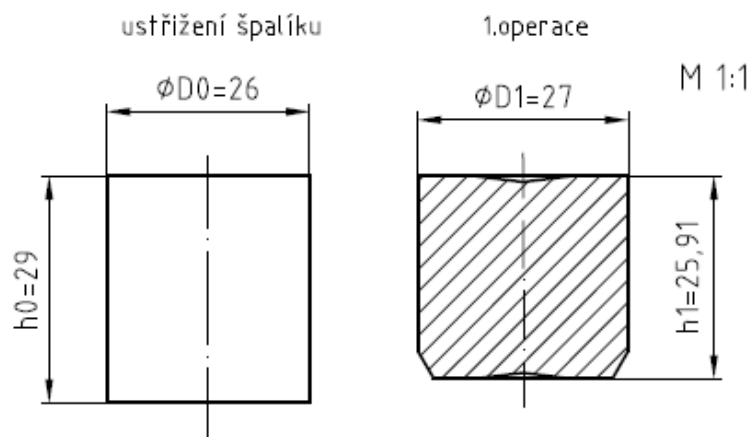
T	23°C
T _m	1500°C
T ₀	20°C

tab.4.1: Parametry Johnson-Cook rovnice pro materiál 11 320 5R [13]

Konstitutivní rovnice Johnson-Cook: [13]

$$\sigma_p = (A + B \cdot \varphi^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varphi}) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0} \right)^m \right) \quad (4.32)$$

1.operace – předpěchování průměru $\phi D_0 = 26\text{mm}$ na $\phi D_1 = 27\text{mm}$



Obr.4.11: Geometrický model 1.operace

Logaritmické přetvoření v 1.operaci:

$$\varphi_{\text{predpech}} = \ln \frac{D_1^2}{D_0^2} = \ln \frac{27^2}{26^2} = \underline{\underline{0,075}} \quad (4.33)$$

Maximální rychlost přetvoření v osovém směru 1.operace:

Nejprve je třeba stanovit rychlost pohybu nástroje, která souvisí s typem zvoleného tvářecího stroje. Parametry potřebné pro výpočet jsou zvolené z údajů získaných výrobcem tvářecího stroje HATEBUR AKP 5-5

$$v = \frac{s}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot n \cdot h}{t \cdot 10^3} = \frac{2 \cdot 80 \cdot 204}{60 \cdot 10^3} = \underline{\underline{0,544 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}}} \quad (4.34)$$

kde: n - počet zdvihů za minutu [mm]

h - zdvih beranu [mm]

t - čas [s]

$$\dot{\varphi}_z = \frac{v}{h_{12}} = \frac{0,544}{0,02444} = \underline{\underline{22,25 \text{ s}^{-1}}} \quad (4.35)$$

Přirozený přetvárný odpor v 1.operaci:

Dle rovnice 4.32 a parametrů v tab.4.1 pro $\varphi = 0,075$ a $\dot{\varphi} = 22,25 \text{ s}^{-1}$ (4.36)

$$\sigma_{p1} = (450 + 350 \cdot 0,075^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln 22,25) \cdot \left(1 - \left(\frac{23 - 20}{1500 - 20}\right)^{0,7}\right) = \underline{\underline{773,2 \text{ MPa}}}$$

Deformační odpor dle Siebela v 1.operaci:

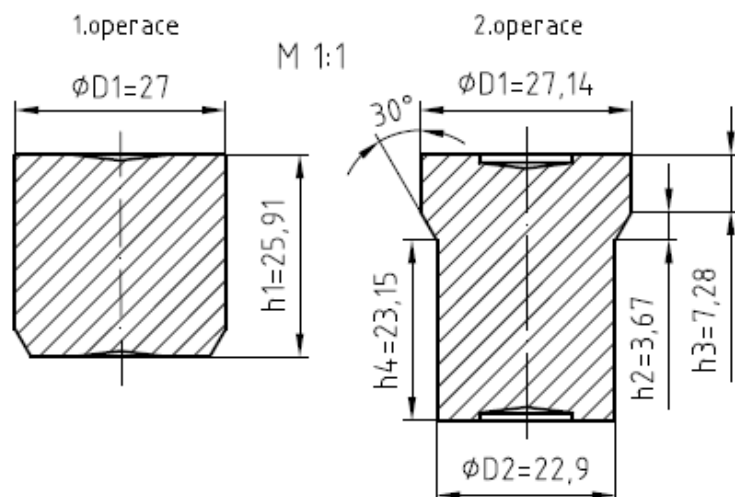
$$\sigma_{d1} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{f \cdot D_1}{h_1}\right) = 773,2 \cdot \left(1 + \frac{1}{3} \cdot \frac{0,05 \cdot 27}{25,91}\right) = \underline{\underline{786,6 \text{ MPa}}} \quad (4.37)$$

Síla v 1.operaci:

$$F_1 = \sigma_{d1} \cdot S = \sigma_{d1} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 786,6 \cdot \frac{\pi \cdot 27^2}{4} = \underline{\underline{450,3 \text{ kN}}} \quad (4.38)$$

Práce v 1.operaci:

$$A_1 = F_1 \cdot h = F_1 \cdot (h_0 - h_{12}) = 450,3 \cdot (29 - 24,44) = \underline{\underline{2053,3 \text{ J}}} \quad (4.39)$$

2.operace – Dopředné protlačování průměru $\phi D_1 = 27\text{mm}$ na $\phi D_2 = 22,9\text{mm}$ 

Obr.4.12: Geometrický model 2.operace

Logaritmicke přetvoření ve 2.operaci:

$$\varphi_{dopř1} = \ln \frac{D_1^2}{D_2^2} = \ln \frac{27^2}{22,9^2} = \underline{\underline{0,329}} \quad (4.40)$$

$$\varphi_S = \frac{\varphi_{dopř1} + \varphi_{predpech}}{2} = \frac{0,329 + 0,075}{2} = \underline{\underline{0,202}} \quad (4.41)$$

Maximální rychlost přetvoření ve 2.operaci: [15]

$$\dot{\varphi}_Z = 2 \cdot v \cdot \frac{R_1^2}{R_2^3} \cdot \tan \alpha = 2 \cdot 0,544 \cdot \frac{\left(\frac{27,14}{2}\right)^2}{\left(\frac{22,9}{2}\right)^3} \cdot \tan 30^\circ = \underline{\underline{77,01 \text{ s}^{-1}}} \quad (4.42)$$

Střední přirozený přetvárný odpor ve 2.operaci:

$$\text{Dle rovnice 4.32 a parametrů v tab.4.1 pro } \varphi_S = 0,202 \text{ a } \dot{\varphi} = 77,01 \text{ s}^{-1} \quad (4.43)$$

$$\sigma_{pS} = (450 + 350 \cdot 0,202^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln 77,01) \cdot \left(1 - \left(\frac{23 - 20}{1500 - 20}\right)^{0,7}\right) = \underline{\underline{825,3 \text{ MPa}}}$$

Deformační odpor dle Feldmanna ve 2.operaci: [1]

$$\sigma_{d2} = \left[\left(1 + \frac{f}{\pi \cdot \alpha}\right) \cdot \ln \left(\frac{D_1^2}{D_2^2}\right) + \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi \cdot \alpha}{180} \right] \cdot \sigma_{pS} + \frac{4 \cdot f \cdot D_2 \cdot h_4}{D_1^2} \cdot \sigma_{pS} + \frac{4 \cdot f \cdot h_3}{D_1} \cdot \sigma_{p1} \quad (4.44)$$

$$\sigma_{d2} = \left[\left(1 + \frac{0,05}{\pi \cdot 60}\right) \cdot \ln \left(\frac{27^2}{22,9^2}\right) + \frac{2}{3} \cdot \frac{\pi \cdot 60}{180} \right] \cdot 825,3 + \frac{4 \cdot 0,05 \cdot 22,9 \cdot 23,15}{27^2} \cdot 825,3 +$$

$$+ \frac{4 \cdot 0,05 \cdot 7,28}{27} \cdot 773,2 = \underline{\underline{1022,1 \text{ MPa}}} \quad (4.45)$$

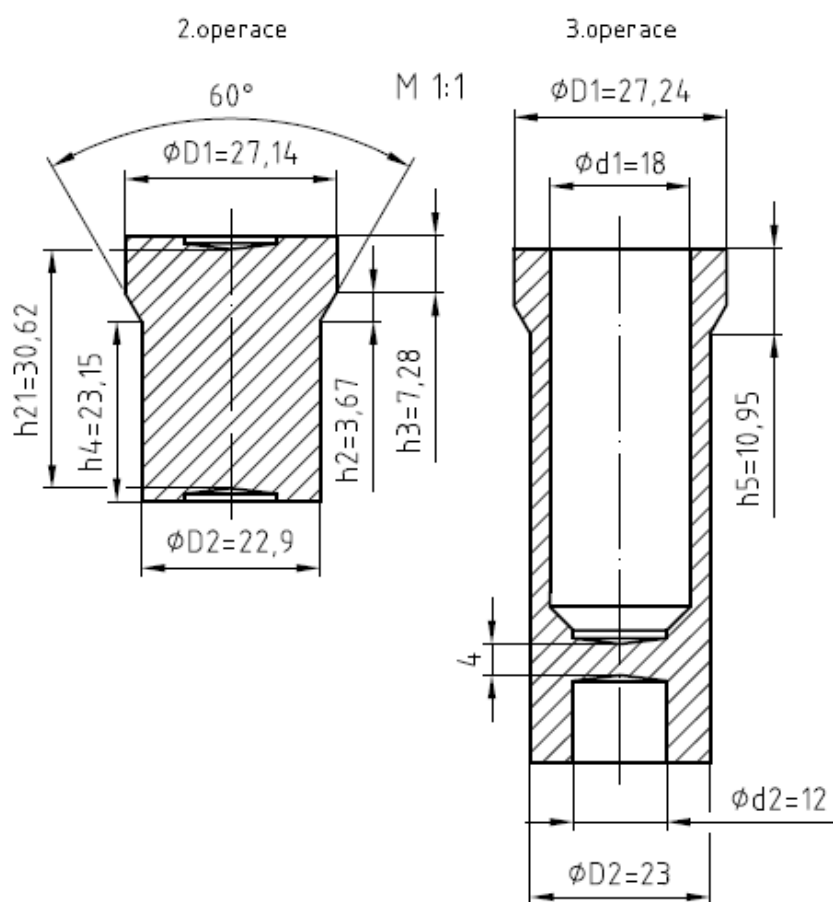
Síla v 2.operaci:

$$F_2 = \sigma_{d2} \cdot S = \sigma_{d2} \cdot \frac{\pi \cdot D_1^2}{4} = 1022,1 \cdot \frac{\pi \cdot 27^2}{4} = \underline{\underline{585,2 \text{ kN}}} \quad (4.46)$$

Práce ve 2.operaci:

$$A_2 = F_2 \cdot h = F_2 \cdot h_4 = 585,2 \cdot 23,15 = \underline{\underline{13547,4 \text{ J}}} \quad (4.47)$$

3.operace – Zpětné protlačování



Obr.4.13: Geometrický model 3.operace

Výpočty pro první část pouzdra o průměru $\phi d_1 = 18\text{mm}$

Logaritmické přetvoření ve 3.operaci

$$\varphi_{valeur1zpet} = \left| \ln \frac{D_2^2 - d_1^2}{D_2^2} \right| = \left| \ln \frac{23^2 - 18^2}{22,9^2} \right| = |-0,939| \quad (4.48)$$

$$(4.49)$$

$$\varphi_{valce1} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{dopř1}| + |\varphi_{valeur1zpet}| = |0,075| + |-0,329| + |-0,939| = \underline{\underline{1,343}}$$

Maximální rychlost přetvoření ve 3.operaci: [15]

$$\dot{\varphi}_z = \frac{v}{R \cdot \tan \alpha + h_{bl}} = \frac{0,544}{0 \cdot \tan \alpha + 0,004} = \frac{0,544}{0,004} = \underline{\underline{136 \text{ s}^{-1}}} \quad (4.50)$$

Přirozený přetvárný odpor ve 3.operaci:

Dle rovnice 4.32 a parametrů v tab.4.1 pro $\varphi_{valce1} = 1,343$ a $\dot{\varphi} = 136 \text{ s}^{-1}$ (4.51)

$$\sigma_{p3} = (450 + 350 \cdot 1,343^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln 136) \cdot \left(1 - \left(\frac{23 - 20}{1500 - 20}\right)^{0,7}\right) = \underline{\underline{1026,8 \text{ MPa}}}$$

Výpočet deformačního odporu je volen dle Siebela, protože tento vztah uvažuje s předpokladem větší tloušťky stěny než je jedna desetina průměru určeného k protlačení. Výpočet deformačního odporu pro zpětné protlačování podle Dippera nelze v tomto případě využít z důvodu nesplnění podmínky poměru výšky výchozího polotovaru, ku hloubce dna průtlačku kde platí $h_0/b \leq 2$ až 2,2.

Tloušťka stěny:

$$t = \frac{D_2 - d_1}{2} = \frac{23 - 18}{2} = 2,5 \quad t > 1,8 \quad (4.52)$$

Podmínka tloušťky stěny vyhovuje.

Deformační odpor ve 3.operaci dle Siebela: [1]

$$\sigma_{d3} = 1,152 \cdot \sigma_{p3} \cdot \frac{D_1^2}{d_1^2} \cdot \left(\log \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_1^2} + \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \cdot \log \frac{D_1^2}{d_1^2} + \log \frac{d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \right) \quad (4.53)$$

$$\sigma_{d3} = 1,152 \cdot 1026,8 \cdot \frac{23^2}{18^2} \cdot \left(\log \frac{23^2}{23^2 - 18^2} + \frac{23^2}{23^2 - 18^2} \cdot \log \frac{23^2}{18^2} + \log \frac{18^2}{23^2 - 18^2} \right)$$

$$\sigma_{d3} = \underline{\underline{2232,6 \text{ MPa}}} \quad (4.54)$$

Síla ve 3.operaci na protlačení vnitřního průměru

$$F_3 = \sigma_{d3} \cdot S = \sigma_{d3} \cdot \frac{\pi \cdot d_1^2}{4} = 2232,6 \cdot \frac{\pi \cdot 18^2}{4} = \underline{\underline{568,1 \text{ kN}}} \quad (4.55)$$

Výpočty pro druhou část pouzdra o průměru $\varnothing d_2 = 12 \text{ mm}$

Logaritmické přetvoření ve 3.operaci

$$\varphi_{valec2zpet} = \left| \ln \frac{D_2^2 - d_2^2}{D_2^2} \right| = \left| \ln \frac{23^2 - 12^2}{22,9^2} \right| = |-0,309| \quad (4.56)$$

$$\varphi_{valce2} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{dopr1}| + |\varphi_{valec2zpet}| = |0,075| + |-0,329| + |-0,309| = \underline{\underline{0,713}} \quad (4.57)$$

Maximální rychlost přetvoření ve 3.operaci: [15]

$$\dot{\varphi}_Z = \frac{v}{R \cdot tg\alpha + h_{bl}} = \frac{0,544}{0 \cdot tg\alpha + 0,004} = \frac{0,544}{0,004} = \underline{\underline{136 \text{ s}^{-1}}} \quad (4.58)$$

Přirozený přetvárný odpor ve 3.operaci:

Dle rovnice 3.32 a parametrů v tab.4.1 pro $\varphi_{valce2} = 0,713$ a $\dot{\varphi} = 136 \text{ s}^{-1}$ (4.59)

$$\sigma_{p3} = (450 + 350 \cdot 0,713^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln 136) \cdot \left(1 - \left(\frac{23 - 20}{1500 - 20}\right)^{0,7}\right) = \underline{\underline{977 \text{ MPa}}} \quad (4.60)$$

Deformační odpor ve 3.operaci dle Siebela: [16]

$$\sigma_{d3} = 1,152 \cdot \sigma_{p3} \cdot \frac{D_1^2}{d_2^2} \cdot \left(\log \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_2^2} + \frac{D_1^2}{D_1^2 - d_2^2} \cdot \log \frac{D_1^2}{d_2^2} + \log \frac{d_2^2}{D_1^2 - d_2^2} \right) \quad (4.61)$$

$$\sigma_{d3} = 1,152 \cdot 977 \cdot \frac{23^2}{12^2} \cdot \left(\log \frac{23^2}{23^2 - 12^2} + \frac{23^2}{23^2 - 12^2} \cdot \log \frac{23^2}{12^2} + \log \frac{12^2}{23^2 - 12^2} \right) \quad (4.62)$$

$$\sigma_{d3} = \underline{\underline{2013,6 \text{ MPa}}}$$

Síla ve 3.operaci na protlačení vnitřního průměru

$$F_3 = \sigma_{d3} \cdot S = \sigma_{d3} \cdot \frac{\pi \cdot d_2^2}{4} = 2013,6 \cdot \frac{\pi \cdot 12^2}{4} = \underline{\underline{227,7 \text{ kN}}} \quad (4.63)$$

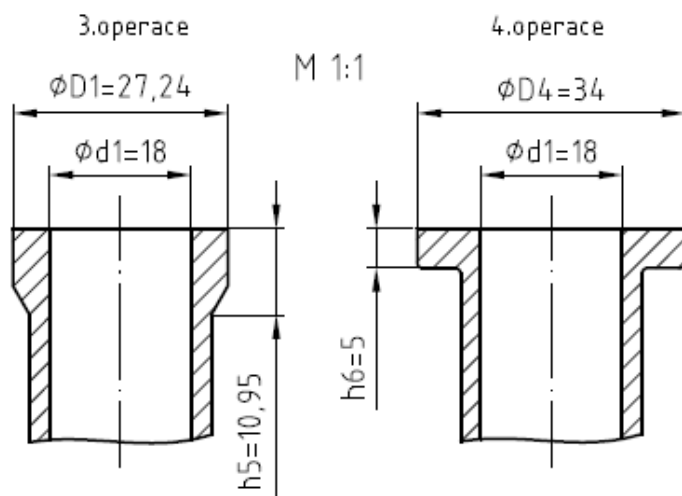
Celková síla pro 3.operaci

$$F_3 = F_{3,1} + F_{3,2} = 568,1 + 227,7 = \underline{\underline{795,8 \text{ kN}}} \quad (4.64)$$

Celková práce pro 3.operaci

$$A_3 = F_3 \cdot (h_{21} - h_{bl}) = 795,8 \cdot (30,62 - 4) = \underline{\underline{21184,1 \text{ J}}} \quad (4.65)$$

4.operace – přechování hlavy pouzdra na průměr $\phi D_4 = 34\text{mm}$



Obr.4.14: Geometrický model 4.operace

Logaritmické přetvoření ve 4.operaci

$$|\varphi_{zpet}| = \left| \ln \frac{D_1^2 - d_1^2}{D_1^2} \right| = \left| \ln \frac{27,24^2 - 18^2}{27,14^2} \right| = |-0,579| \quad (4.66)$$

$$|\varphi_{pech}| = \left| \ln \frac{D_4^2 - d_1^2}{D_1^2 - d_1^2} \right| = \left| \ln \frac{34^2 - 18^2}{27,24^2 - 18^2} \right| = |0,700| \quad (4.67)$$

$$\varphi_{hlavy} = |\varphi_{predpech}| + |\varphi_{zpet}| + |\varphi_{pech}| = |0,075| + |-0,579| + |0,700| = \underline{\underline{1,35}} \quad (4.68)$$

Maximální rychlost přetvoření ve 4.operaci:

$$\dot{\phi}_Z = \frac{v}{h_5} = \frac{0,544}{0,005} = \underline{\underline{108,8 \text{ s}^{-1}}} \quad (4.69)$$

Přirozený přetvárný odpor ve 4.operaci:

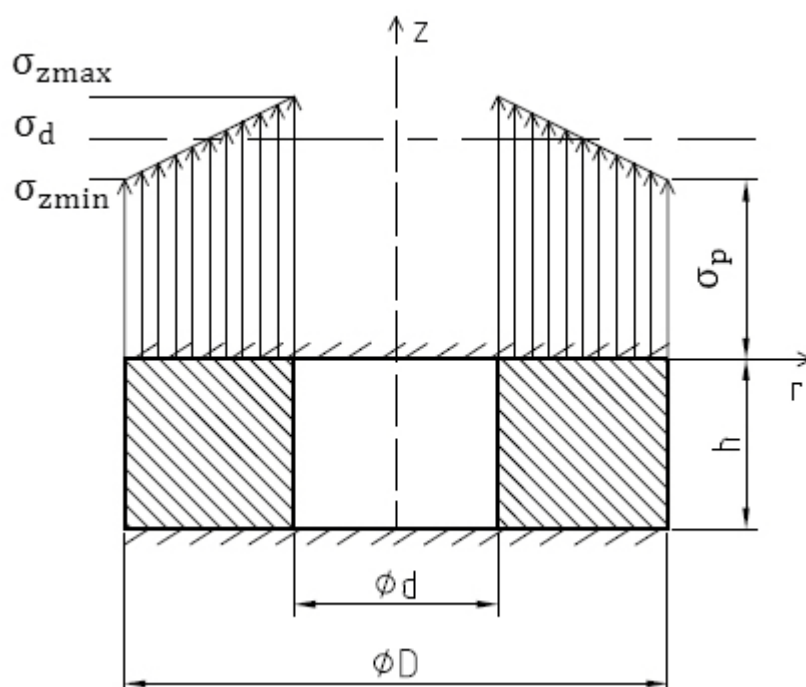
Dle rovnice 4.32 a parametrů v tab.4.1 pro $\varphi_{hlavy} = 1,35$ a $\dot{\phi} = 108,8 \text{ s}^{-1}$ (4.70)

$$\sigma_{p4} = (450 + 350 \cdot 1,35^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln 108,8) \cdot \left(1 - \left(\frac{23 - 20}{1500 - 20}\right)^{0,7}\right) = \underline{\underline{1017,3 \text{ MPa}}}$$

Deformační odpor dle modelu Siebela ve 4.operaci:

Ve 4.operaci nepřechujeme konečný tvar válce ale tvar prstence, tudíž musíme odvodit Siebelův vztah pro určení deformačního odporu. Tento vztah vychází z geometrického modelu pro pěchování prstence.

Geometrický model:



Obr.4.15: Geometrický model pěchování prstence

Matematický model:

při výpočtech vycházíme z diferenciální rovnice:

$$\frac{d\sigma_z}{dr} + \frac{2\tau}{h} = 0 \quad (4.71)$$

Tuto diferenciální rovnici integrujeme za předpokladu $\tau = -f \cdot \sigma_p$

$$\int d\sigma_z = -\frac{2\tau}{h} \int dr \rightarrow \sigma_z = -\frac{2\tau}{h}r + C \rightarrow \sigma_z = \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_p}{h}r + C \quad (4.72)$$

Okrajové podmínky předpokládáme $r = \frac{D}{2}$, $\sigma_z = -\sigma_p$ a dosazením do rovnice 4.72 dostaneme:

$$-\sigma_p = \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_p}{h} \cdot \frac{D}{2} + C \quad (4.73)$$

následně dopočítáme konstantu C viz. rovnice 4.74, a dosadíme zpět do rovnice 4.73. Po úpravě obdržíme rovnici 4.75

$$C = -\sigma_p - \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_p}{h} \cdot \frac{D}{2} \quad (4.74)$$

$$\sigma_z = \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_p}{h} \cdot r - \sigma_p - \frac{2 \cdot f \cdot \sigma_p}{h} \cdot \frac{D}{2}$$

$$\sigma_z = -\sigma_p \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \left(\frac{D}{2} - r \right) \right] \quad (4.75)$$

Dosadíme okrajové podmínky $r = \frac{D}{2}, r = \frac{d}{2}$ a dostaneme:

$$\sigma_{zmin} = -\sigma_p \quad (4.76)$$

$$\sigma_{zmax} = -\sigma_p \cdot \left[1 + \frac{2 \cdot f}{h} \left(\frac{D}{2} - \frac{d}{2} \right) \right] \quad (4.77)$$

Deformační odpor získáme ze vztahu:

$$\sigma_d = -\sigma_{zmin} - \frac{1}{3}(\sigma_{zmax} - \sigma_{zmin}) \quad (4.78)$$

$$\sigma_d = \sigma_p \cdot \left[1 + \frac{f \cdot (D - d)}{3 \cdot h} \right]$$

$$\sigma_{d4} = \sigma_{p4} \cdot \left(1 + \frac{f \cdot (D_4 - d_1)}{3 \cdot h_6} \right) = 1017,3 \cdot \left(1 + \frac{0,05 \cdot (34 - 18)}{3 \cdot 5} \right) = \underline{\underline{1125,8 \text{ MPa}}} \quad (4.79)$$

Síla ve 4.operaci na napěchování hlavy pouzdra:

$$F_4 = \sigma_{d4} \cdot S = \sigma_{d4} \cdot \frac{\pi \cdot (D_4^2 - d_1^2)}{4} = 1125,8 \cdot \frac{\pi \cdot (34^2 - 18^2)}{4} = \underline{\underline{735,7 \text{ kN}}} \quad (4.80)$$

Práce ve 4.operaci:

$$A_5 = F_4 \cdot h = F_4 \cdot (h_5 - h_6) = 735,7 \cdot (10,95 - 5) = \underline{\underline{4377,4 \text{ J}}} \quad (4.81)$$

5.operace – ustřižení blány

Síla v 5.operaci:

$$F_5 = \pi \cdot d_2 \cdot h_{bl} \cdot 0,8 \cdot R_m \cdot 1,2 = \pi \cdot 12 \cdot 4 \cdot 0,8 \cdot 614 \cdot 1,2 = \underline{\underline{88,9 \text{ kN}}} \quad (4.82)$$

Práce v 5.operaci:

$$A_5 = F_5 \cdot h_{bl} = 88,9 \cdot 4 = \underline{\underline{355,6 \text{ J}}} \quad (4.83)$$

Celková tvářecí síla:

$$F_C = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 + F_5 = 450,3 + 585,2 + 795,8 + 734,7 + 88,9 = \underline{\underline{2654,9 \text{ kN}}} \quad (4.84)$$

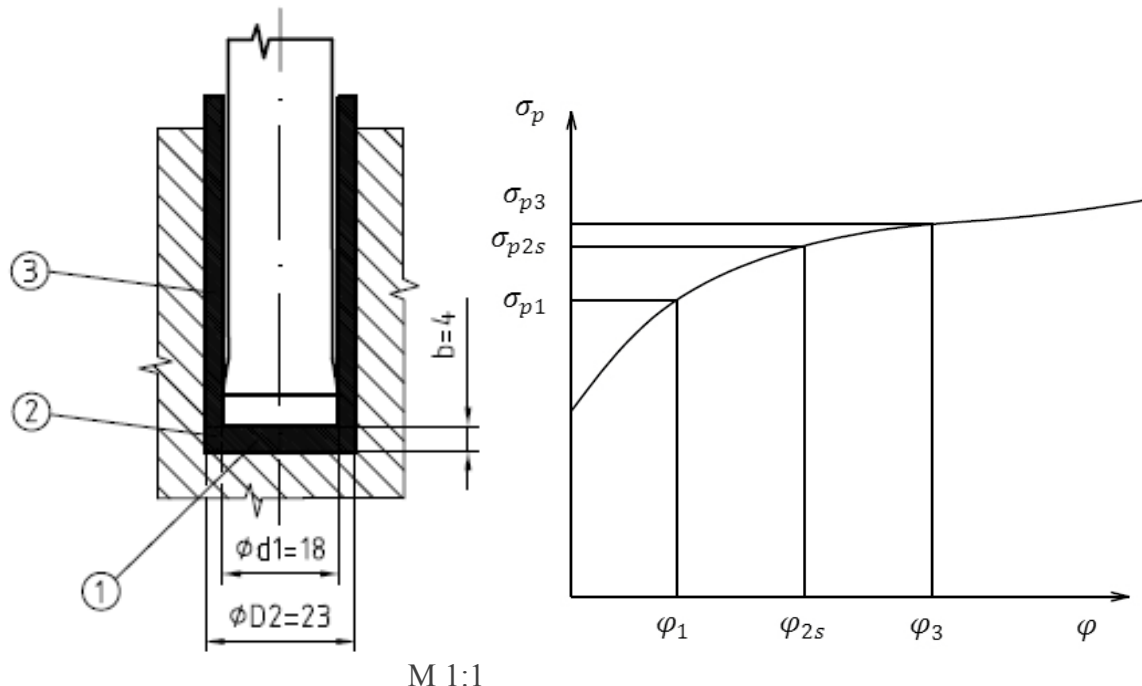
Celková tvářecí práce:

$$A_C = A_1 + A_2 + A_3 + A_4 + A_5 = 2053,3 + 13547,4 + 21184,1 + 4377,4 + 355,6 = \underline{\underline{41517,8 \text{ J}}} \quad (4.85)$$

4.5. Výpočet radiálního tlaku ve 3.operaci [3], [16]

Návrh zapouzdření průtlachnice v objímce přímo závisí na radiálním tlaku, který působí na stěnu průtlachnice. Z praktických výpočtů únosnosti objímek je známo, že při radiálním tlaku do 1000MPa není zapotřebí využití objímek. Od 1000-1600MPa je nutné použití jedné objímky a pro tlaky 1600-2000MPa je zapotřebí dimenzovat lisovnici do dvou objímek.

Radiální tlak, který působí na stěnu lisovnice vychází ze vztahu dle Dippera. Podle Dippera ale není navržen deformační odpor ve třetí tvářecí operaci, protože není splněna podmínka poměru výšky výchozího polotovaru, ku hloubce dna kde platí $h_0/b \leq 2$ až 2,2. Z toho důvodu je voleno řešení dle Siebela. Vzájemné porovnání hodnot deformačních odporů podle Dippera a Siebela vede ke stanovení výsledného odhadu radiálního tlaku pro třetí operaci.



Obr.4.16: Schéma zpětného protlačování dle Dippera [3]

Logaritmické přetvoření v jednotlivých oblastech podle Dippera:

$$\varphi_1 = \ln \frac{h_0}{b} = \ln \frac{30,6}{4} = \underline{\underline{2,03}} \quad (4.86)$$

$$\varphi_3 = \varphi_1 \cdot \left(1 + \frac{d}{8 \cdot s}\right) = 2,03 \cdot \left(1 + \frac{18}{8 \cdot 2,5}\right) = \underline{\underline{3,857}} \quad (4.87)$$

$$\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_1 = 3,857 - 2,03 = \underline{\underline{1,827}} \quad (4.88)$$

$$\varphi_{2s} = \frac{\varphi_1 + \varphi_3}{2} = \frac{2,03 + 3,857}{2} = \underline{\underline{2,943}} \quad (4.89)$$

Přirozený přetvárný odpor podle konstitutivní rovnice Johnson-Cook:

$$\sigma_{p1} = (A + B \cdot \varphi_1^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varphi}) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right) \quad (4.90)$$

$$\sigma_{p1} = (450 + 350 \cdot 2,03^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln 136) \cdot \left(1 - \left(\frac{23 - 20}{1500 - 20}\right)^{0,7}\right) = \underline{\underline{1062,4 \text{ MPa}}} \quad (4.91)$$

$$\sigma_{p2s} = (A + B \cdot \varphi_{2s}^n) \cdot (1 + C \cdot \ln \dot{\varphi}) \cdot \left(1 - \left(\frac{T - T_0}{T_m - T_0}\right)^m\right) \quad (4.92)$$

$$\sigma_{p2s} = (450 + 350 \cdot 2,943^{0,18}) \cdot (1 + 0,055 \cdot \ln 136) \cdot \left(1 - \left(\frac{23 - 20}{1500 - 20}\right)^{0,7}\right) = \underline{\underline{1096,9 \text{ MPa}}} \quad (4.93)$$

Deformační odpor dle Dippera:

$$\sigma_{dD} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{f_1 \cdot d}{3 \cdot b}\right) + \sigma_{p2s} \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot f_{2s} \cdot b}{D - d}\right) \quad (4.94)$$

$$\sigma_{dD} = 1062,4 \cdot \left(1 + \frac{0,1 \cdot 18}{3 \cdot 4}\right) + 1096,9 \cdot \left(1 + \frac{2 \cdot 0,3 \cdot 4}{23 - 18}\right) = \underline{\underline{2845,2 \text{ MPa}}} \quad (4.95)$$

Radiální tlak dle Dippera:

$$\sigma_{rD} = \sigma_{p1} \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot f_{2s} \cdot b}{D - d}\right) = 1062,4 \cdot \left(1 + \frac{4 \cdot 0,3 \cdot 4}{23 - 18}\right) = \underline{\underline{2082,3 \text{ MPa}}} \quad (4.96)$$

Porovnání deformačního odporu dle Siebela a Dippera:

$$\frac{\sigma_{dD}}{\sigma_{dS}} = \frac{2845,2}{2232,6} = \underline{\underline{1,274}} \quad (4.97)$$

$$\sigma_{rS} = \frac{\sigma_{rD}}{1,274} = \frac{2082,3}{1,274} \cong \underline{\underline{1634,5 \text{ MPa}}} \quad (4.98)$$

Tímto radiálním tlakem σ_{rD} vyděleným poměrem deformačního odporu dle Dippera a Siebela se získá hledaný odhad radiálního tlaku při deformačním odporu podle Siebela. Radiální tlak působící na stěnu průtláčnice ve 3.tvářecí operaci vyšel 1634,5 MPa. Lisovnici bude tedy potřeba zapouzdřit do dvou objímek.

4.6. Návrh sestavy nástroje [7], [19]

Volba tvářecího stroje

Pro vybranou variantu B technologického postupu výroby součásti je vhodný pětistupňový tvářecí automat HATEBUR AKP 5-5 o jmenovité síle $F_j=3500\text{kN}$. Celková vypočítaná tvářecí síla činí 2654,9 kN.

Vnější část stroje je vybavena portálovým jeřábem sloužícím pro manipulaci a ustavení bloku nástroje do odhlučňené komory konstrukce stroje, kde probíhá tvářecí proces. Mazání a chlazení nástrojů zabezpečuje samostatný agregát s čerpadlem. Stroj je vybaven rovnačkou drátu, podávacími kladkami a stříhacím mechanismem. Přesnost stříhu polotovaru je zajištěna senzory. Přesun polotovaru mezi jednotlivými operacemi zajišťuje kleštinový podavač. Pro kontrolu uchopení je v každé pozici vybaven aktivním snímačem. Vynesení polotovaru z pracovního prostoru je provedeno pásovým dopravníkem, který výlisky vynese do stohovací bedny.

Technické údaje lisu:

Tab.4.2: Parametry stroje Hatebur AKP 5-5 [7]

Pracovní rozsah:	
Největší průměr zpracovaného materiálu	27 mm
Délka stříhu	12-170 mm
Maximální podávací délka součásti	170 mm
Maximální průměr součásti	42 mm
Výkonnost:	
Počet zdvihů – počet kusů za minutu	80-120
Tvářecí síla	3500 kN
Tvářecí síla jedné matrice	1500 kN
Výkon elektromotoru	110 kW
Nástroj:	
Tvářecí matrice	5
Rozteč matrice	144 mm
Průměr matrice	110 (115) mm
Průměr lisovníku	110 mm
Zdvih:	
Zdvih beranu	204 mm
Lisovník (variabilní)	2-170 mm
Matrice (variabilní)	70 mm
Rozměry automatu:	
Délka	7600 mm
Šířka	3500 mm
Výška	4050 mm
Výška střední části	1535 mm
Hmotnost	65 t
Hlučnost	85dB (A)



Obr.4.17: Hatebur AKP 5-5[7]

Návrh postupového nástroje

Výkres sestavy je tvořen uspořádanými lisovnicemi, které vedle sebe tvoří dolní polovinu nástroje. Upínací přestavitelné hlavy pro pěchovníky a průtlačníky se nachází vedle sebe v horní polovině postupového nástroje. Činné části vyžadují přesné a tuhé provedení a dokonalé vedení, čímž se zabrání nízké kvalitě protlačků a nadměrnému zatížení průtlačníku vlivem ohybových sil. Funkční části nástroje, tj. průtlačník a průtlačnice, včetně jejich opěrných a upínacích částí, jsou vyměnitelné. Rozsah výkresové dokumentace byl stanoven na navržení dílenských výkresů pro průtlačnici a průtlačníku ze 3.tvářecí operace zvolené varianty výroby součásti.

Průtlačník

Materiál průtlačníku je zvolen ČSN 19 830. Základní mechanické vlastnosti a tepelné zpracování udává tab.3.1 (viz příloha). Zvolen byl průtlačník s kuželovou upínací hlavou. Drsnost povrchu $Ra=0,4$, drsnost povrchu funkčních částí $Ra=0,1$.

tab.4.1: mechanické vlastnosti oceli ČSN 19 830[8]

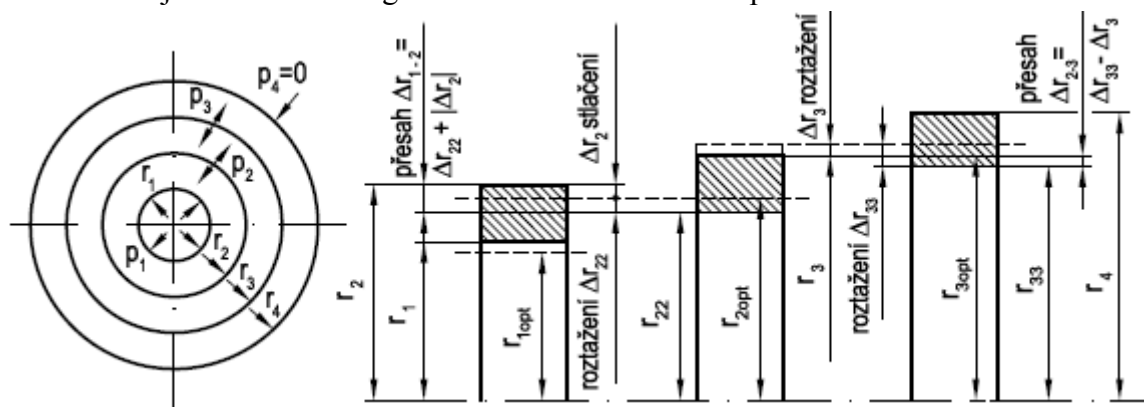
Materiál	HRC	E	Rm	Rp _{0,2}	σ _{dov}
19 830	62	220000	1665	1480	1425

Průtlačnice a objímky

Návrh průtlačnice je dán do značné míry rozměry protlačku a vychází z české normy ČSN 22 7005. Materiál průtlačnice je zvolen SK 65 (slinutý karbid), materiál objímek je navrhnutá nástrojová ocel ČSN 19 733. Základní mechanické vlastnosti materiálů pro průtlačnici a objímky jsou uvedeny v příloze č2.

Pevnostní návrh složené průtlačnice

Z předchozích výpočtů je patrné, že bude lisovnice zapouzdřena do dvou objímek. Optimalizační výpočet složené lisovnice je proveden v programu Optimal, jenž je dostupný na Ústavu strojírenské technologie – Odboru tváření kovů a plastu na VUT FSI v Brně.



Obr.4.18: Geometrický model zapouzdření průtlačnice do dvou objímek [17]

Vstupní hodnoty:

Materiál lisovnice: SK 65 (slinutý karbid)
Materiál objímek: ocel 19 733

$r_1 = 13,6$ mm – poloměr lisovnice
 $r_4 = 57,5$ mm – poloměr 2.objímky
 $p_1 = 1634,5$ MPa – radiální tlak

Dovolené napětí:

$\sigma_{D1} = 850$ MPa
 $\sigma_{D2} = 1525$ MPa
 $\sigma_{D3} = 1525$ MPa

Lodeho parametr napjatosti:

$\beta_1 = 1$
 $\beta_2 = 1,155$
 $\beta_3 = 1,155$

Poměr Mohrovy podmínky křehké pevnosti:

$\kappa_1 = R_m/R_d = 0,356$
 $\kappa_2 = 1$
 $\kappa_3 = 1$

Modul pružnosti v tahu pro objímky:

$E_1 = 460\,000$ MPa
 $E_2 = 206\,000$ MPa
 $E_3 = 206\,000$ MPa

$\mu_1 = 0,26$ – poissonova konstanta pro SK 65
 $\mu_2 = 0,3$ – poissonova konstanta pro ocel 19733
 $\mu_3 = 0,3$ – poissonova konstanta pro ocel 19733

$T_0 = 20^\circ$ - teplota okolí
 $T_{POP} = 570^\circ$ - popouštěcí teplota

Součinitel tepelné roztažnosti – SK 65
 $\alpha_1 = A \cdot T_1 \cdot C$
 $A = 6,5$
 $C = 0,000010$

Součinitel tepelné roztažnosti – ocel 19 733
 $\alpha_2 = (A + T_2 \cdot B) \cdot C$
 $A = 12,8$
 $B = 0,00133$
 $C = 0,000010$

Součinitel tepelné roztažnosti – ocel 19 733
 $\alpha_3 = (A + T_3 \cdot B) \cdot C$
 $A = 12,8$
 $B = 0,00133$
 $C = 0,000010$

Výstupní hodnoty:

$r_2 = 22,26$ mm
 $r_3 = 42,53$ mm
 $p_2 = 1038,29$ MPa
 $p_3 = 398,84$ MPa

$\frac{r_2}{r_1} = 1,637$

$\frac{\sigma_1}{p_1} = 0,520$

$\frac{\sigma_2}{p_1} = 0,933$

$\frac{\sigma_3}{p_1} = 0,933$

Výstupní hodnoty mezi lisovnicí a 1.objímkou:

Deformace vnějšího poloměru lisovnice: $\Delta r_2 = 0,0028$ mm
Deformace vnitřního poloměru lisovnice: $\Delta r_{22} = 0,1118$ mm
Celkový radiální přesah: $2\Delta r_{c1} = 0,229$ mm
Stažení vnitřního otvoru lisovnice: $2\Delta r_1 = -0,069$ mm
Stažení vnějšího otvoru lisovnice: $2\Delta r_2 = 0,068$ mm
Roztažení 1.objímky: $2\Delta r_{22} = 0,160$ mm
Skutečný konstrukční přesah: $2\Delta r_{s1} = 0,252$ mm

Vnější poloměr 1.objímky:	$r_{22} = 22,145 \text{ mm}$
Předpětí mezi lisovnicí a 1.objímkou:	$p_{d2} = 363,300 \text{ MPa}$
Radiální napětí při $p_{d2} = 0$:	$p_2 = 674,989 \text{ MPa}$

Teplota ohřevu 1.objímky:	$T_{ohř1} = 72,89^\circ\text{C}$
Teplota podchlazení lisovnice:	$T_{och} = 0^\circ$

Výstupní hodnoty mezi 1. a 2.objímkou:

Deformace vnějšího poloměru 1.objímky:	$\Delta r_3 = 0,0420 \text{ mm}$
Deformace vnitřního poloměru 2.objímky:	$\Delta r_{33} = 0,3060 \text{ mm}$
Celkový radiální přesah:	$2\Delta r_{c2} = 0,528 \text{ mm}$
Stažení vnitřního otvoru 1.objímky:	$2\Delta r_2 = -0,147 \text{ mm}$
Stažení vnějšího otvoru 1.objímky:	$2\Delta r_3 = 0,149 \text{ mm}$
Roztažení 2.objímky:	$2\Delta r_{33} = 0,377 \text{ mm}$
Skutečný konstrukční přesah:	$2\Delta r_{s2} = 0,581 \text{ mm}$
Vnější poloměr 2.objímky:	$r_{33} = 42,267 \text{ mm}$
Předpětí mezi 1. a 2.objímkou:	$p_{d3} = 247,333 \text{ MPa}$
Radiální napětí při $p_{d3} = 0$:	$p_3 = 151,511 \text{ MPa}$

Teplota ohřevu 2.objímky:	$T_{ohř2} = 77,84^\circ\text{C}$
Teplota podchlazení 1.objímky:	$T_{och} = 0^\circ$

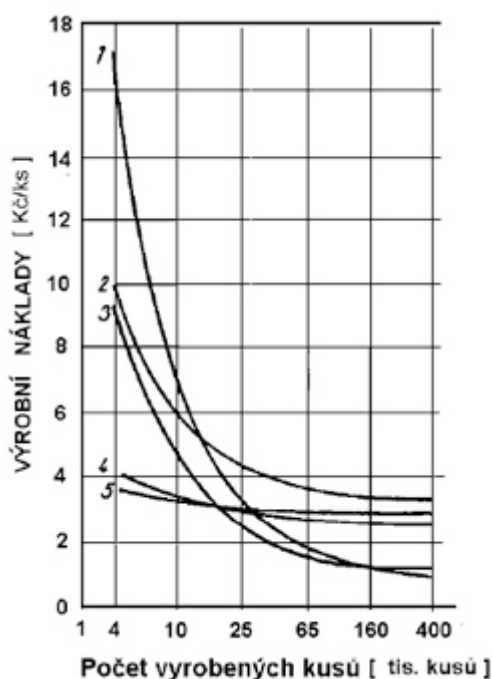
Při volbě rozměrů objímek je vycházeno z rozměru matrice tvářecího automatu. Největšímu poloměru objímky odpovídá rozměr $r_4 = 57,5 \text{ mm}$. Vnitřní poloměr r_1 je dán vnějším rozměrem pouzdra ve 3.tvářecí operaci, tzn. $r_1 = 13,6 \text{ mm}$. Radiální napětí, resp. radiální tlak působící na povrch funkčního otvoru lisovnice dosáhl hodnoty $p_1 = 1634,5 \text{ MPa}$ pro vypočítaný poměr $r_2 / r_1 = 1,637$. Dle materiálového modelu byl vypočítán potřebný přesah pro dosažení optimálního předpětí včetně vypočítané teploty nahlátí objímek. Tato teplota ohřevu pro 1.objímkou leží pod hranicí popouštěcí teploty, což znamená že není nutné podchlazovat lisovnici. Stejně tomu je i v případě ohřevu 2.objímky, kde tato teplota nedosahuje popouštěcí teploty a není potřeba podchlazovat 1.objímkou.

5. TECHNICKO-EKONOMICKÉ HODNOCENÍ [12]

Produktivita výroby strojních součástí je závislá na vhodně zvolené technologii a počtu kusů vyráběných za jeden rok. Při srovnání postupů výroby pouzdra pro vedení pružiny objemovým tvářením za studena s třískovým obráběním zjistíme, že využitím objemového tvářením dosáhneme zvýšené produktivity, lepších mechanických vlastností a celkové jakosti hotového výrobku. U nejvhodnější varianty výroby, je třeba stanovit tzv. rovnovážný bod, tj. místo kde se náklady na výrobu vyrovnají výnosům. Podmínka sériovosti výroby je v tomto případě zajištěna z důvodu plánované roční výroby 250 000 ks.

tab.5.1: Přehled výrobních nákladů [12]

Přímé náklady na materiál	Vlastní náklady výroby	Vlastní náklady výkonů	Úplné vlastní náklady výkonů	Výrobní cena	Prodejní cena
Přímé náklady na mzdy					
Ostatní přímé náklady, energie					
Výrobní režie					
Správní režie					
Odbytové náklady					
Zisk					
Obchodní a odbytové přírážky a srážky					



Z grafu na obr.5.1. je patrné, že s klesajícím počtem kusů se nákladovost výroby v porovnání s obráběním zvyšuje. Pro výrobu součástí objemovým tvářením se investice do tvářecího automatu vyplatí již po dosažení několika tisíců vyráběných kusů.

1 - Postupový tvářecí automat

2 - Jednooperační lis $n=32/\text{min}$ (obsluha jednoho stroje)

3 - Jednooperační lis $n=50/\text{min}$ (obsluha dvou strojů)

4 - Šestivřetenový obráběcí automat

5 - Jednovřetenový obráběcí automat

Obr.5.1: Závislost výrobních nákladů na vyráběném počtu kusů pro různé stroje a technologie výroby jednoduché rotační součásti [12]

Výroba součásti objemovým tvářením

Přímé náklady na materiál:

$$N_1 = n \cdot S \cdot C_m = 250\,000 \cdot 0,114 \cdot 45 = \underline{\underline{1\,282\,500\text{ Kč}}} \quad (5.1)$$

kde: n - počet vyrobených kusů/rok [ks]
 S - spotřeba materiálu [kg/ks]
 C_m - cena materiálu [Kč/kg]

Přímé náklady na mzdy:

$$t = t_A + t_B = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_{B1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,020}{60} + \frac{0,025}{60 \cdot 20\,000} = 0,000330 \text{ hod} \quad (5.2)$$

$$N_2 = t \cdot M \cdot n = 0,000330 \cdot 650 \cdot 250\,000 = \underline{\underline{53\,625\text{ Kč}}} \quad (5.3)$$

kde: t - výrobní čas [hod]
 t_{A1} - čas výrobní na 1 kus [hod]
 t_{B1} - čas přípravný na 1 kus [hod]
 M - hodinová mzda [Kč/hod]
 d_v - počet kusů ve výrobní dávce [ks]

Přímé náklady na energii:

$$N_3 = P \cdot \eta \cdot t_{A1} \cdot c_E \cdot n = 140 \cdot 0,75 \cdot 0,020 \cdot 4,5 \cdot 250\,000 = \underline{\underline{2\,362\,500\text{ Kč}}} \quad (5.4)$$

kde: P - příkon elektromotoru [kW]
 η - účinnost elektromotoru [hod]
 c_E - cena energie [Kč/kWh]

Celkové přímé náklady:

$$N_C = N_1 + N_2 + N_3 = 1\,282\,500 + 53\,625 + 2\,362\,500 = \underline{\underline{3\,698\,626\text{ Kč}}} \quad (5.5)$$

Z důvodu nedostatku potřebných vstupních dat není možné zjistit celou ekonomickou studii nákladů a režií. Proto jsou odhadované náklady zahrnuty do celkových vypočítaných nákladů.

$$N_C = \underline{\underline{4\,000\,000\text{ Kč}}}$$

Přímé náklady na 1 kus:

$$N_{C1} = \frac{N_C}{n} = \frac{4\,000\,000}{250\,000} = \underline{\underline{16\text{ Kč}}} \quad (5.6)$$

Fixní náklady:

$$N_F = \underline{\underline{300\,000\text{ Kč}}}$$

Fixní náklady tvoří v tomto případě náklady na nástroje.

Zisk 15% na výrobě součásti za jeden rok:

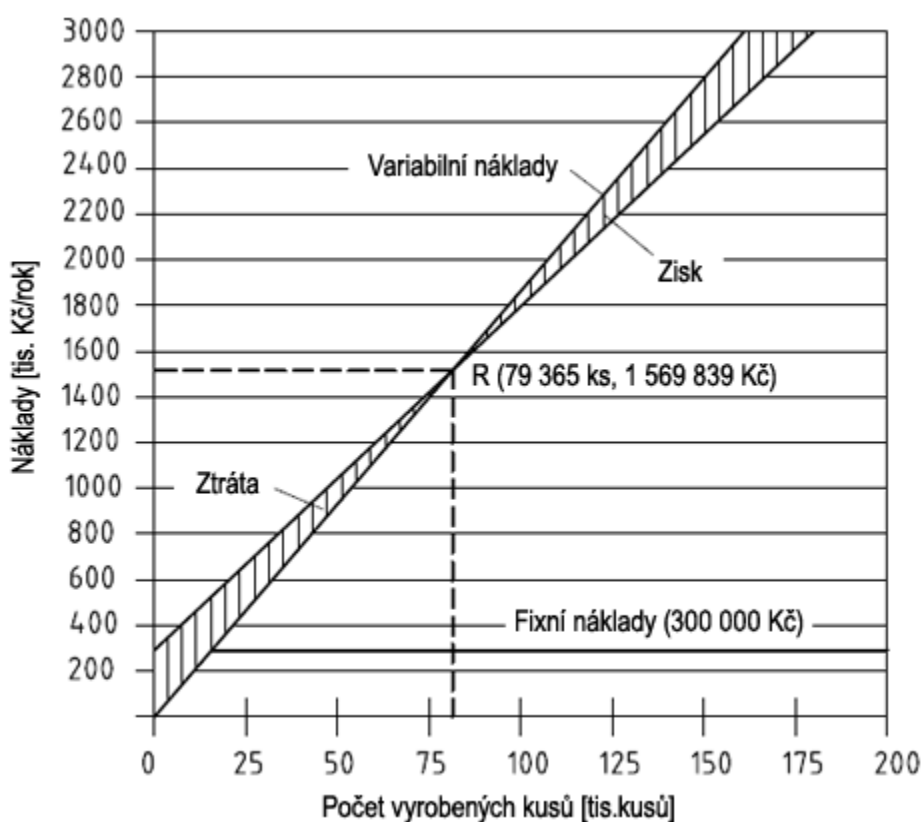
$$Z_{15} = \frac{(N_C + N_F) \cdot 15}{100} = \frac{(4\,000\,000 + 300\,000) \cdot 15}{100} = 645\,000 \text{ Kč} \quad (5.7)$$

Cena jednoho kusu při zachování zisku 15%:

$$C_{15} = \frac{N_C + N_F + Z_{15}}{n} = \frac{4\,000\,000 + 300\,000 + 645\,000}{250\,000} = 19,78 \text{ Kč} \quad (5.8)$$

Rovnovážný bod:

$$R = \frac{N_F}{C_{15} - N_{C1}} = \frac{300\,000}{19,78 - 16} = \underline{\underline{79\,365 \text{ ks}}} \quad (5.9)$$



Obr.4.2: Náklady na výrobu pouzdra objemovým tvářením

Výroba součásti třískovým obráběním

Přímé náklady na materiál:

$$N_1 = n \cdot S \cdot C_m = 250\,000 \cdot 0,492 \cdot 45 = \underline{\underline{5\,535\,000 \text{ Kč}}} \quad (5.10)$$

kde: n – počet vyrobených kusů/rok [ks]

S – spotřeba materiálu [kg/ks]

C_m – cena materiálu [Kč/kg]

Pozn.: spotřeba materiálu vychází z rozměru polotovaru o průměru $\varnothing 38 \times 64 \text{ mm}$, který se bude následně obrábět. Hmotnost polotovaru se stanoví z objemu a činí 0,492 kg.

Přímé náklady na mzdy:

$$t = t_A + t_B = \frac{t_{A1}}{60} + \frac{t_{B1}}{60 \cdot d_v} = \frac{0,20}{60} + \frac{0,05}{60 \cdot 20\,000} = 0,000330 \text{ hod} \quad (5.11)$$

$$N_2 = t \cdot M \cdot n = 0,00330 \cdot 650 \cdot 250\,000 = \underline{\underline{536\,250 \text{ Kč}}} \quad (5.12)$$

kde: t – výrobní čas [hod]
 t_{A1} – čas výrobní na 1 kus [hod]
 t_{B1} – čas přípravný na 1 kus [hod]
 M – hodinová mzda [Kč/hod]
 d_v – počet kusů ve výrobní dávce [ks]

Přímé náklady na energii:

$$N_3 = P \cdot \eta \cdot t_{A1} \cdot c_E \cdot n = 15 \cdot 0,8 \cdot 0,20 \cdot 4,5 \cdot 250\,000 = \underline{\underline{2\,700\,000 \text{ Kč}}} \quad (5.13)$$

kde: P – příkon elektromotoru [kW]
 η – účinnost elektromotoru [hod]
 c_E – cena energie [Kč/kWh]

Celkové přímé náklady:

$$N_C = N_1 + N_2 + N_3 = 5\,535\,000 + 536\,250 + 2\,700\,000 = \underline{\underline{8\,771\,250 \text{ Kč}}} \quad (5.14)$$

Do celkových vypočítaných nákladů zahrneme i náklady odhadované a poté získáme hodnotu:

$$N_C = \underline{\underline{9\,000\,000 \text{ Kč}}}$$

Přímé náklady na 1 obrobek:

$$N_{C1} = \frac{N_C}{n} = \frac{9\,000\,000}{250\,000} = \underline{\underline{36 \text{ Kč}}} \quad (5.15)$$

Technické zhodnocení:

Z technologických návrhů variant řešení je patrné, že výroba objemovým tvářením za studena je možná třemi variantami. Nejvhodnější stanovená varianta B v kapitole 4.2 vychází z předpokladu rovnoměrného zpevnění hlavy i dříku. Na základě celkové velikosti tvářecí síly byl zvolen pětistupňový automat HATEBUR AKP 5-5, který bude plně využit při navržené variantě technologického postupu na pět tvářecích operací.

Ekonomické zhodnocení:

Z ekonomického hlediska vyplývá, že výroba součásti objemovým tvářením bude mnohem méně nákladnější na materiál, mzdy a energie. Celkové náklady a náklady na 1 kus jsou o více než jednu polovinu menší než u výroby třískovým obráběním, a proto je doporučeno výrobu pouzdra sériově vyrábět technologií objemového tvářením za studena.

6. ZÁVĚRY

Cílem práce bylo zpracování návrhu výroby pouzdra pro vedení pružiny metodou objemového tváření za studena z materiálu 11 320 5R. V teoretické části byly rozebrány a vysvětleny základy objemového tváření za studena včetně materiálů polotovarů a nástrojů. V další části byly pro danou výrobu navrženy tři varianty řešení. Pro zpracování řešení byla zvolena varianta B, která vychází z rovnoměrného přetvoření dříku a hlavy. Z vypočtených přetvoření dříku a hlavy je zpětně vypočítán výchozí průměr polotovaru, který bude vstupovat do tvářecího nástroje. Vybraný technologický postup se skládá z odstřížení polotovaru z tyče kruhového průřezu, následného fosfatizování, napuštění mýdlem a v následujících pěti operacích je výchozí polotovar tvářen do finálního tvaru za využití technologií pěchování, dopředného a zpětného protlačování a stříhu blány v poslední operaci.

Následně se práce zabývá technologickými výpočty logaritmického přetvoření, rychlostmi deformace, přirozených přetvárných odporů, deformačních odporů, tvářecích sil a prací. Tvářecí síla byla vypočítána pro každou tvářecí operaci a na základě její celkové velikosti byl navržen postupový lis HATEBUR AKP 5-5, který umožňuje výrobu v pěti tvářecích operacích. Pomocí programu Optimal, dostupného na Ústavu strojírenské technologie – Odboru tváření kovů a plastu na VUT FSI v Brně, jsou stanoveny přesné rozměry pro pevnostní návrh složené průtlačnice a její zapouzďení do dvou objímek ve 3.tvářecí operaci. Počet objímek je volen na základě výpočtu radiálního tlaku působícího na stěnu průtlačnice, jenž vyšel v rozmezí hodnot 1600-2000MPa. Výkresová dokumentace byla zpracována pro průtlačník zpětného protlačování a průtlačnici ve 3.tvářecí operaci a pro celkovou sestavu nástroje.

Technicko-ekonomickým hodnocením byly srovnány možnosti výroby součásti jak objemovým tvářením, tak třískovým obráběním. Z vypočítaných hodnot je zřejmé, že tvářením dosáhneme značné úspory na materiálu, mzdách, i energiích oproti třískovému obrábění. Při sérii 250 000 ks za rok je cena součásti 16 Kč za 1 kus. Při nákladech na nástroje ve výši 300 000 Kč dosáhneme rovnovážného bodu již při výrobě 79 300 ks.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] FELDMAN, Heinz D. *Protlačování oceli*. 1.vyd. Praha: SNTL, 1962, 196 s.
- [2] BABOR, Karel, CIVILINEK, Augustin, FIALA, Jan. *Objemové tváření oceli*. 1.vyd. Praha: SNTL-Nakladatelství technické literatury, 1967. 332 s. ISBN 04-239-67.
- [3] FOREJT, Milan, PÍŠKA, Miroslav. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006, 225 s. ISBN 80-214-2374-9.
- [4] KOTOUČ, Jiří, ŠANOVEC, Jan, ČERMÁK, Jan, MÁDLE, Luděk. *Tvářecí nástroje*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. 349 s. ISBN 80-01-01003-1.
- [5] KŘÍŽ, Rudolf. *Strojírenská příručka 8. svazek: V- Tváření, W- Výrobky se slinovaných prášků, X- Výrobky z plastů, Z- Svařování součástí, Z- Protikorozi ochrana materiálu*. 1. vyd. Praha: Scientia, 1998, 255 s. ISBN 80-718-3054-2.
- [6] DVOŘÁK, Milan, GAJDOŠ, František, NOVOTNÝ, Karel. *Technologie tváření: Plošné a objemové tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, s.r.o., 2003. 169 s. ISBN 80-214-2340-4.
- [7] Hatebur Umformmaschinen AG. Hatebur [online]. Hatebur Umformmaschinen AG, 2013 [cit. 2013-05-12]. Hatebur coldmatic AKP 5-5 produkts. Dostupné z WWW: < <http://www.hatebur.com/hatebur-en/products/coldmatic/akp-5-5.php> >.
- [8] LEINVEBER, Jan, Jaroslav ŘASA, Pavel VÁVRA. *Strojnické tabulky*. 2. vyd. Praha: Scientia, spol. s r.o., 1998. 911 s. ISBN 80-7183-123-9.
- [9] LANGE, Kurt, et al. *Handbook of metal forming*. Kurt Lange. 1st edition. New York : McGraw-Hill Book Company, 1985. 1156 s. ISBN 0-07-036285-8.
- [10] ČSN 22 7005 *Tvářecí nástroje. Protlačování ocelí za studena*. Všeobecné požadavky na konstrukci a výpočet. Schválena: 05.1991. Účinnost: 1992-06-01.
- [11] FOREJT, Milan, HUMÁR Anton, PÍŠKA Miroslav, JANÍČEK Libor. *Experimentální metody, Syllabus* [online], 2003, 83 s. [cit. 2013-05-13]. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření. Dostupné z WWW: < <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm> >.
- [12] FOREJT, Milan. *Oborový projekt 2* [online]. 2003, 94 s. [cit. 2013-05-13]. Dostupné z WWW: < <http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/opory.htm> >.
- [13] FOREJT, Milan. *Mechanické vlastnosti vybraných ocelí za vyšších rychlostí deformace* : Databáze materiálových modelů k predikci chování materiálů v tvářecím procesu [online]. [s.l.], 2004. 5 s. Grant ČR. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav strojírenské technologie, odbor tváření. Dostupné z WWW: < http://ust.fme.vutbr.cz/tvareni/database_modelu_soubory/ocel_113205r.pdf >.
- [14] PTÁČEK, Luděk. *Nauka o materiálu II.* 2.rozš. vyd. Brno: CERM, 2002, 397 s. ISBN 80-720-248-3.
- [15] FOREJT, Milan. *Konstitutivní vztahy pro rychlosti deformace v technologiích tváření*. In The 2nd International Conference FORM'95. Volume 1. Brno: TU Brno, PC-DIR Co.Ltd, 1995. s. 77-82. ISBN: 80-214-0664-X.

- [16] FOREJT, Milan. *Teorie tváření*. 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 167 s. ISBN 80-214-2764-7.
- [17] FOREJT, M., J. KREJČOVÁ a R. KAPITÁNOVÁ. *The optimization of compound forming dies geometry*. International conference on Industrial Tools:ICIT97. 1997, s.8.
- [18] ELFMARK, Jiří, et al. *Tváření kovů*. Praha: SNTL, 1992, 524 s. Technický průvodce; sv. 62. ISBN 80-030-0651-1.
- [19] Hatebur Umformmaschinen AG. Hatebur [online] *Produktový katalog tvářecích strojů*, 2013[cit. 2013-05-13] Dostupné z WWW:
< <http://www.hatebur.com/hatebur-en/products/coldmatic/akp-5-5.php>>.
- [20] MIELNIK, Edward M. *Metalworking science and Engineering*. New York: McGraw-Hill, c1991, 976 s. McGraw-Hill series in materials science and engineering. ISBN 00-704-1904-3.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotky
D, d	průměr	[mm]
R, r	poloměr	[mm]
V	objem	[mm ³]
π	ludolfovo číslo	[-]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
R _m	mez pevnosti v tahu	[MPa]
R _e	výrazná mez kluzu	[MPa]
R _{p0,2}	smluvní mez kluzu	[MPa]
A _{5,10}	tažnost	[%]
Z	kontrakce	[%]
A	práce	[J]
F	síla	[N]
S	plocha	[mm ²]
α	úhel	[°]
h	délka	[mm]
h _{bl}	délka blány	[mm]
φ	logaritmické přetvoření	[-]
v	rychlost pohybu beranu	[m/s]
s	dráha beranu	[mm]
n	počet zdvihů	[-]
t	čas	[s]
f	součinitel tření	[-]
σ_r	radiální napětí	[MPa]
σ_d	deformační odpor	[MPa]
σ_{ps}	střední přirozený přetvárný odpor	[MPa]
σ_D	dovolené napětí	[MPa]
σ_p	přirozený přetvárný odpor	[MPa]
μ	poissonovo číslo	[-]
φ_z	rychlost deformace ve směru osy z	[s ⁻¹]
A, B, C	koeficienty konstitutivní rovnice	[-]
m	součinitel citlivosti na rychlosti deformace	[-]
T	Teplota součásti	[°C]
T _m	Teplota tavení	[°C]
T ₀	Teplota okolí	[°C]
T _{POP}	popouštěcí teplota	[°C]
κ	poměr meze pevnost v tlaku ku tahu	[]
β	lodeho parametr	[-]
p	tlak	[MPa]
Δr_2	deformace vnějšího poloměru lisovnice	[mm]
Δr_{22}	deformace vnitřního poloměru lisovnice	[mm]
$2\Delta r_{c1}$	celkový radiální přesah	[mm]
$2\Delta r_1$	stažení vnitřního otvoru lisovnice	[mm]
$2\Delta r_2$	stažení vnějšího otvoru lisovnice	[mm]
$2\Delta r_{22}$	roztažení 1.objímky	[mm]
$2\Delta r_{s1}$	skutečný konstrukční přesah	[mm]
r ₂₂	vnější poloměr 1.objímky	[mm]
p _{d2}	předpětí mezi lisovnicí a 1.objímkou	[MPa]

Δr_3	deformace vnějšího poloměru 1.objímky	[mm]
Δr_{33}	deformace vnitřního poloměru 2.objímky	[mm]
$2\Delta r_{c2}$	celkový radiální přesah	[mm]
$2\Delta r_2$	stažení vnitřního otvoru 1.objímky	[mm]
$2\Delta r_3$	stažení vnějšího otvoru 1.objímky	[mm]
$2\Delta r_{33}$	roztažení 2.objímky	[mm]
$2\Delta r_{s2}$	skutečný konstrukční přesah	[mm]
r_{33}	vnější poloměr 2.objímky	[mm]
p_{d3}	předpětí mezi 1. a 2.objímkou	[MPa]
N_1	náklady na materiál	[Kč]
N_2	náklady na mzdy	[Kč]
N_3	náklady na energie	[Kč]
N_c	celkové náklady	[Kč]
N_{c1}	náklady na 1 kus	[Kč]
S	spotřeba materiálu	[kg/ks]
n	počet kusů	[ks]
C_m	cena materiálu	[Kč/kg]
N_f	fixní náklady	[Kč]
t_{A1}	čas výrobní na 1 kus	[hod]
t_{B1}	čas přípravný na 1 kus	[hod]
M	hodinová mzda	[Kč/kg]
d_v	počet kusů ve výrobní dávce	[ks]
η	účinnost elektromotoru	[-]
P	příkon stroje	[kW]
R	rovnovážný bod	[ks]

SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1 – Materiálové vlastnosti oceli 11 320-5R

Příloha 2 – Nástrojové materiály pro objímky a průtlačnice

Příloha 3 – Součinitele tepelné roztažnosti

Příloha 4 – Výkres součásti č.v. A4-5061-002

Příloha 5 – Výkres průtlačnice č.v. A4-5061-001/01

Příloha 6 – Výkres průtlačníku č.v. A4-5061-001/02

Příloha 7 – Výkres sestavy nástroje č.v. A1-5061-001

Příloha 8 – Kusovník č.v. A4-5061-01

Ocel 11 320 5R

Materiál : **Ocel obvyklých jakostí vhodná ke tváření za studena**

Označení : ČSN 41 1320 dle chemického složení odpovídá oceli ČSN EN 10204 s úpravami dle podnikové normy PN 42 04 92 pro ocelové dráty kruhového průřezu od ϕ 1 do 20 mm, tažené za studena, (dále jen ocel 11 320 5R).

Význam dalších označení: 5- mořený, tažený, žíhaný naměkko, mořený a tažený s úběrem 5%
R- tažený v mýdlovém prášku

Zahraniční ekvivalenty -označení:

ISO	Cr01	ISO 17/12N49-69
DIN	St12	DIN 1623-72 (1.0320)
Rusko	08kp	GOST 9045-80
Švédsko	1142	SS 141142-75

Chemické složení v %:

	C %	Mn%	Si %	P %	S %	Al %	Cr %	Cu %
Atest dle ²⁾ ČSN EN 10 204	0,05	0,30	0,05	0,011	0,011	-	-	-
ČSN 41 1320 ¹⁾	Max 0,11	-	-	max. 0,045	max. 0,045	-	-	-
Spektrometr ³⁾ LECO GDS 750 *	0,05	0,33	0,06	0,017	0,012	0,027	0,16	0,06

- Poznámky:
- ¹⁾ Lexikon technických materiálů
 - ²⁾ Inspekční certifikát Železáren a drátoven Bohumín -ŽDB
 - ³⁾ Certifikace ČSN/ISO 9003/ EN 29003 VUT FSI ÚMI v Brně

Polotovary: Tažený ocelový drát pro výrobu spojovacích součástí ϕ 15,5 mm
Mechanické vlastnosti dle ČSN EN 10204, certifikátu ŽDB Bohumín č.762/97 ²⁾

			11 320 5R
Mez kluzu	Rp0,2	MPa	-
Mez pevnosti	Rm	MPa	314
Tažnost	A5	%	-
Kontrakce	Z	%	78,4

Aktuální stav: tažený drát ϕ 15,5 mm, ocel 11 320 5R

Mechanické vlastnosti: (zkušební tyč dle ČSN 42 03 16) ³⁾

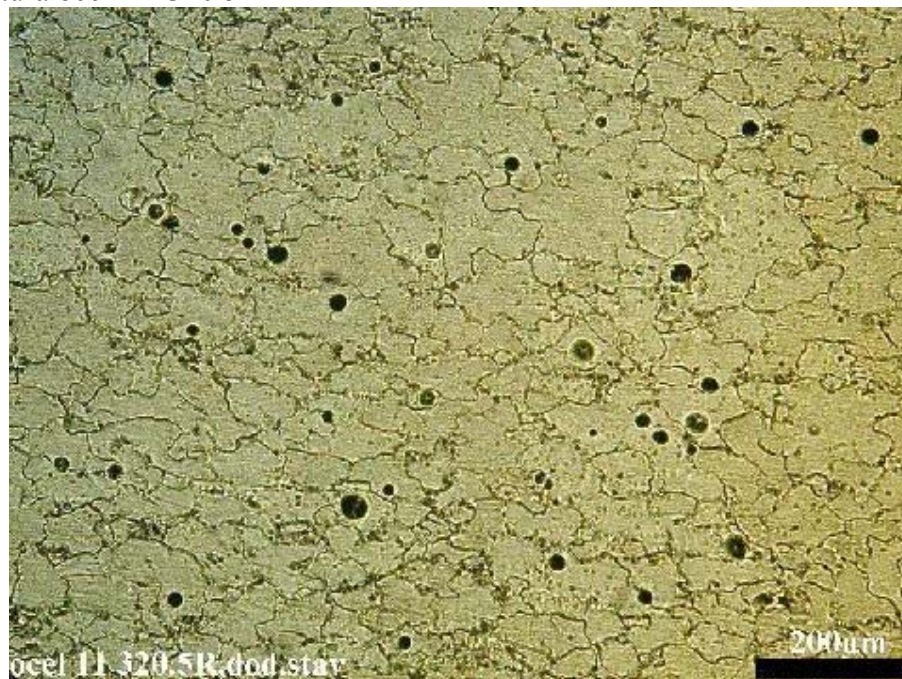
			11 320 5R
Mez kluzu	Rp0,2	MPa	589
Mez pevnosti	Rm	MPa	614
Tažnost	A5	%	15,2
Tvrdość		HV ₁₀	170
Kontrakce	Z	%	70,6
Modul pružnosti v tahu	E	GPa	201

Hollomonova aproximace tahové zkoušky

$$\sigma = k \cdot (\varphi)^n$$

$k = 643,3 \text{ MPa}$
 $n = 0,008$

Výchozí struktura oceli 11 320 5R



~100 x



~ 500 x

Ocel 11 320 5R má feritickou strukturu a obsahuje globulární vměstky kysličníku železa, křemíku a hliníku. Oxidy hliníku jsou často spojené se siričkem manganu. Struktura je rovnoměrná a má střední velikost zrna okolo 70 μm (minimální okolo 20 μm a

Příloha 1

maximální okolo $200\text{ }\mu\text{m}$). Cementit, terciální, se vyskytuje na hranicích zrn především v okolí trojných bodů. Střední tvrdost oceli je okolo $\text{HV}_{10}=170$.



~ 200 x

Deformační dvojčata v okolí čela vzorku 3-5 při rychlosti dopadu $63,6\text{ m/s}$



~ 200 x

Mikrostruktura nezatíženého konce vzorku 3-5



~ 400 x

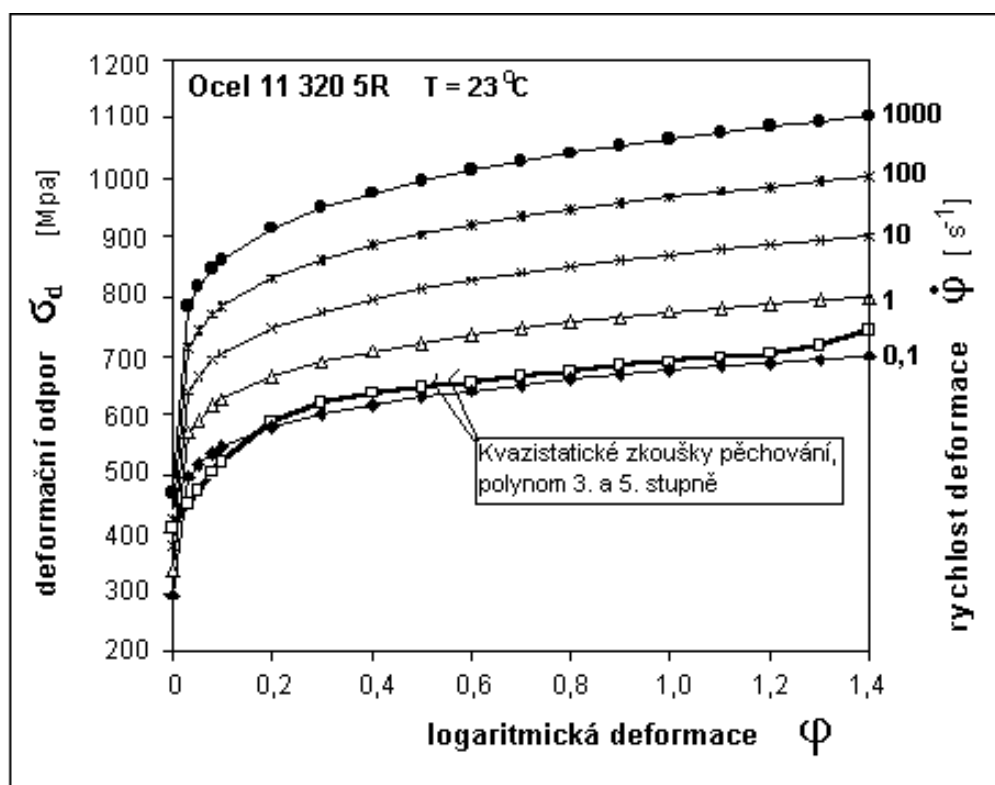
Ohyb deformačních dvojčat v okolí čela vzorku 3-6 při rychlosti dopadu $110,2\text{ m/s}$.



~ 400 x

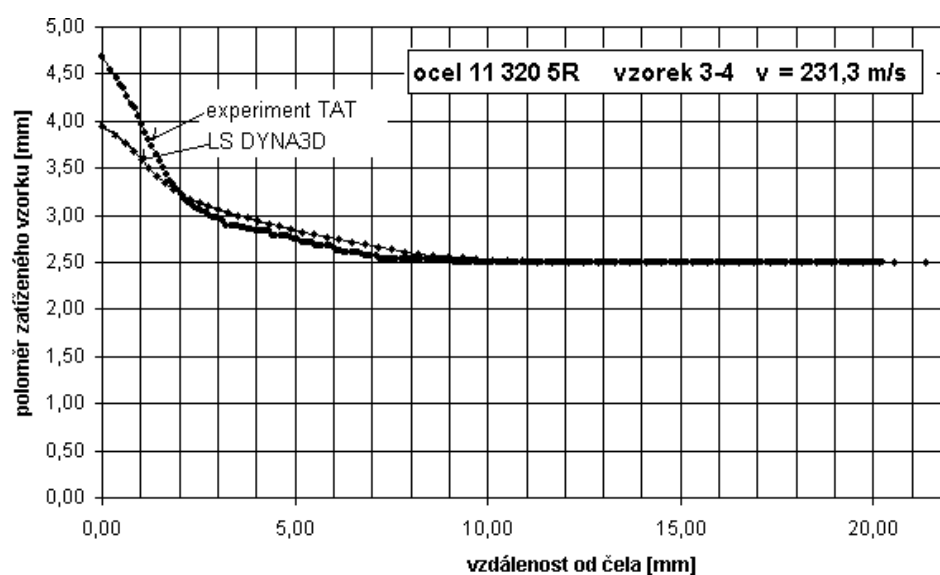
Plastická deformace se smykovými pásy povrchové vrstvy při rychlosti dopadu $231,8\text{ m/s}$.

Parametry konstitutivní Johnson-Cook rovnice pro kompresní test	
σ_0	450
B	350
C	0,055
n	0,18
m	0,7



Křivky deformačních odporů (deformačních napětí) oceli 11 320 5R

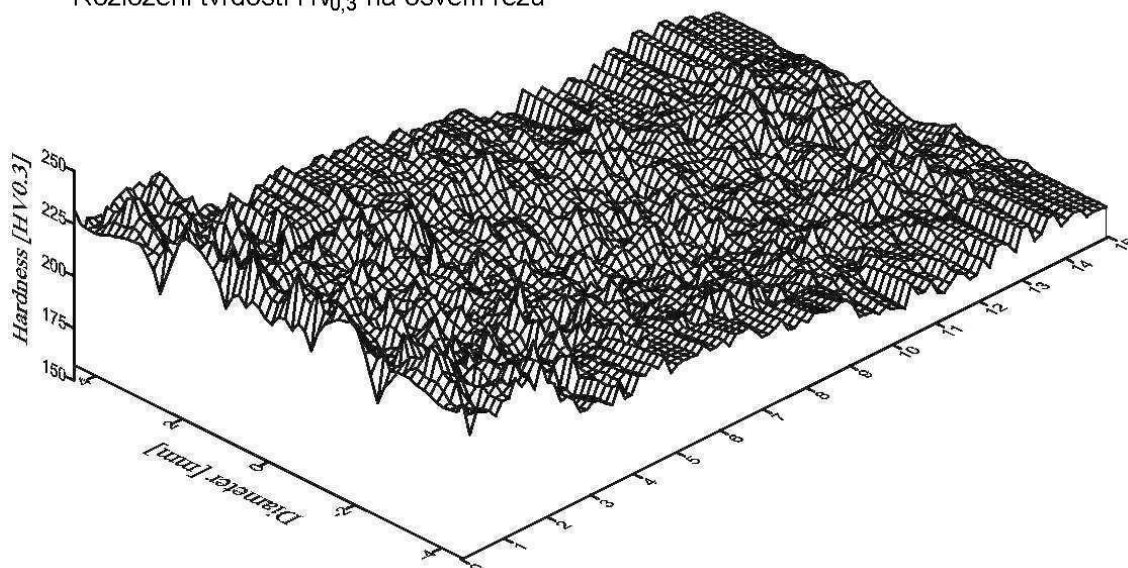
Příloha 1



Porovnání skutečného a simulovaného tvaru vzorku 3-4
po Taylorově kompresním testu

Ocel 11320 5R, vzorek 3-4, $v_0 = 231,3$ m/s

Rozložení tvrdostí $HV_{0,3}$ na osovém řezu



Rozložení tvrdostí $HV_{0,3}$ na osovém řezu vzorku 3-4

Příloha 3

VÝBĚR NÁSTROJOVÝCH MATERIÁLŮ PRO PRŮTLAČNICE A OBJÍMKY

	Materiál	T _{KAL}	T _{POP}	HRC	E	μ	R _m	R _d	R _{p0,2}	σ _D	α	R	
L I S O V N I C E	SK 64	-	-	84	490000	0,26	1000	3400	0	750	0,0000065		
	SK 65	-	-	82,5	460000	0,26	1130	3140	0	850	0,000007		
	Ocel Mo-V 19830 M2 S 6-5-2 1.3343 EN HS 6-5-2	1140	620	62	220000	0,33	1665	3670	1480	1425	0,0000124	34	
	Ocel Cr 19436 D3 X210Cr12 1.2080 EN X210CrW12	1060	520	59	208000	0,30	1860	3680	-	1620	0,0000128		
				60									
				61									
O B J Í M K A	Ocel W-Cr-Si 19733 60WCrV7 1.2550 EN 55WCrV8	920	570	47	206000	0,30	1790	-	1670	1525	0,0000136		
			600	49									
	Ocel 19740	1025	500	47	207000	0,30	1570	-	1320	1300	0,0000126		
			600	46			1480		1390	1360			
			620	45			1410		1370	1340			
	Ocel Si-Cr 19452 62SiMnCr4 1.2101	850	370	50	206000	0,30	1745	3040	1560	1500	0,0000130		
			400	47			1645	3090	1500	1450			
	Ocel 14.260.7 olej	840	450	49,5	200000		1670		1470				
			580	44			0370		1170				
	Ocel 14 260.8	880	400	51			1770		1580	1500			
			540	46			1470		1270				
	Ocel Ni-Cr-Mo 19655 X45NiCrMo4 1.2767 EN 40NiCrMoV16											Forejt 2008	

Příloha 4

Diagramy roztažnosti objímky a lisovnice s vlivem teploty pouzdření

